

**UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA ACADÊMICA – PRAC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL**

Clério Bezerra de França

**AVALIAÇÃO DE CLORETOS LIVRES EM CONCRETOS PELO
MÉTODO DE ASPERSÃO DE SOLUÇÃO DE NITRATO DE PRATA**

**Recife
2011**

Clério Bezerra de França

**AVALIAÇÃO DE CLORETOS LIVRES EM CONCRETOS PELO
MÉTODO DE ASPERSÃO DE SOLUÇÃO DE NITRATO DE PRATA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Civil da Universidade Católica de
Pernambuco, como parte dos requisitos necessários para
obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil

ORIENTADORA: Prof^a. Dra. Eliana Cristina Barreto Monteiro

**Recife
2011**

F814a

França, Clério Bezerra de

Avaliação de cloretos livres em concretos pelo método de aspersão de solução de nitrato de prata / Clério Bezerra de França ; orientadora Eliana Cristina Barreto Monteiro, 2011.

103 f. : il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Católica de Pernambuco. Pró-reitoria Acadêmica. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, 2011.

1. Construção civil - Brasil. 2. Cimento Portland. 3. Concreto armado. 4. Cloretos livres - corrosão. 5. Armaduras. I. Título..

CDU- 624.012.45

AVALIAÇÃO DE CLORETOS LIVRES EM CONCRETOS PELO MÉTODO DE ASPERSÃO DE SOLUÇÃO DE NITRATO DE PRATA

Clério Bezerra de França

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Católica de Pernambuco, como parte dos requisitos necessários para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil na área de Concentração em Engenharia das Construções.

Aprovado por:

Prof. Dr. Joaquim Teodoro Romão
(Examinador interno – Engenharia Civil - UNICAP)

Prof. Dr. Pedro Castro Borges
(Examinador Externo -

Prof^a. Dra. Eliana Cristina Barreto Monteiro
(Orientadora – Engenharia Civil - UNICAP)

**Recife / Pernambuco / Brasil
2011**

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho:

Primeiramente a Deus, que me dá força e saúde nessa caminhada;

Aos meus pais, que com sua integridade, perseverança e amor me ensinaram a enfrentar os obstáculos da vida;

À minha esposa, que sempre me estimulou, compreendendo as minhas ausências e incentivando-me a cada vez mais acreditar no meu potencial;

Às minhas filhas Rafaela e Luana, que tantas vezes presenciaram os meus momentos de aflição e mesmo assim me incentivaram, servindo de inspiração a este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Aos meus professores do mestrado, que fizeram parte da minha história de vida e me possibilitaram buscar a relação entre a educação tradicional e a construtiva, contribuindo assim para a construção deste trabalho;

Aos colegas do Mestrado, que proporcionaram momentos de atenção e colaboração durante o período de estudo na Instituição;

Aos colegas de trabalho de pesquisa da Universidade de Pernambuco, que muito colaboraram para a execução deste trabalho;

A meu irmão Cleto Bezerra, pelo incentivo e estímulo para a realização deste trabalho;

Ao Prof. Célio Souto Maior, pela ajuda e compreensão na consecução desta dissertação;

Aos laboratoristas André Miranda e Washington Espósito, que mostraram grande interesse e dedicação no desenvolvimento das atividades;

Em especial, à minha orientadora, Professora Eliana Cristina Barreto Monteiro, pela felicidade de ter-me dado a conhecer sua maneira de trabalho, o que me proporcionou com ela construir um elo de colaboração mais profundo.

RESUMO

A corrosão por cloretos é considerada por muitos pesquisadores a mais severa das manifestações patológicas que atacam as armaduras. O objetivo principal deste trabalho é avaliar a presença de cloretos livres em concreto de cimento Portland pelo método de aspersão de solução de nitrato de prata. A verificação de ataque por cloreto na estrutura é normalmente feita através de exames laboratoriais, demorados em que apresentam um custo muito alto. Pesquisando a aplicabilidade do método de aspersão de nitrato de prata *in loco*, em materiais à base de cimento Portland como indicador com capacidade de informar a presença ou não de contaminação por cloretos, evitando assim de imediato o teste laboratorial. Para que os resultados destes ensaios tivessem credibilidade quanto à presença de cloretos livres nas amostras, foi realizado, paralelamente à aspersão de nitrato de prata, um acompanhamento das amostras através de ensaios eletroquímicos. Observou-se com os resultados experimentais da pesquisa que a aplicabilidade do método de aspersão de solução de nitrato de prata vem a ser de grande relevância para o meio técnico, por ser um método qualitativo, de fácil aplicação, barato e provendo informações rápidas para que os profissionais da área de engenharia possam diagnosticar com segurança as estruturas com corrosão contaminadas por cloreto.

Palavras chave: cloretos livres; nitrato de prata; cimento Portland; corrosão; argamassas e concreto.

ABSTRACT

The corrosion by chlorides is considered by a number of researchers the most dangerous pathological manifestation attacking concrete reinforcements. The assessment of the attacks to the structure by sodium chloride is usually done in the laboratory, takes too long and costs too much. The main reason for this work is to assess the presence of free chlorides in Portland cement concrete and mortar through the silver nitrate aspersion method, which is justified by the fact that Our objective is to evaluate the applicability of the silver nitrate aspersion method *in loco*, in Portland-cement-based materials as indicators capable of showing the presence or not of contamination by chlorides, avoiding the immediate need for lab tests. So as to give credibility to the test for presence of free chlorides in the samples, these were checked by means of electrochemical tests in parallel with the silver nitrate aspersion. The experimental results of these tests showed that the applicability of the silver nitrate aspersion method seems to be of great relevance in the technical environment, as it is a qualitative method, easily applicable, inexpensive and capable of providing quick information so that professionals can safely diagnose the levels of chloride corrosion in the structures.

Keywords: free chlorides; silver nitrate; Portland cement; corrosion; mortars and concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Incidência de manifestações patológicas em estruturas de concreto armado no Estado de Pernambuco (Fonte: Andrade, 1997).....	2
Figura 2.1 - Classificação da corrosão de armaduras de acordo a morfologia.....	10
Figura 2.2 - Frente de penetração de cloretos (NT BUILD 492 (2000)).....	20
Figura 2.3 – Relação entre cloretos totais, livres e fator água /cimento de concretos, argamassas e pastas de cimento (Otsuki <i>et al.</i> , 1992).....	23
Figura 3.1 - Curva granulométrica do agregado.....	29
Figura 3.2 - Formato do aço tipo CA - 50 utilizados no experimento.....	32
Figura 3.3 - Dimensões do aço tipo CA – 50 utilizado no experimento	32
Figura 3.4 - moldes utilizados no preparo dos CP's	34
Figura 3.5 - Dimensões do corpo-de-prova: (a) usado na resistência à compressão, (b) usado na avaliação de cloretos livres e (c) usado para as medidas eletroquímicas	34
Figura 3.6 - ensaio de abatimento (Slump Test)	37
Figura 3.7 - Corpos-de-prova utilizados no ensaio de resistência à compressão	41
Figura 3.8 - Máquina universal de ensaios.....	41
Figura 3.9 - Esclerômetro de reflexão	42
Figura 3.10 - Sequência da determinação da profundidade de carbonatação	43
Figura 3.11 - Aplicação do nitrato de prata nos corpos-de-prova.....	45
Figura 3.12 - Avaliação da presença de cloretos nos corpos-de-prova.....	45

Figura 4.1 - Relação da resistência à compressão (28 dias), moldados com diversos tipos de cimentos e íons-cloreto.....	49
Figura 4.2 - Média dos Índices esclerométricos	52
Figura 4.3 - Índice esclerométrico por percentual de cloretos	52
Figura 4.4 - Posição de leitura no CP para medida da profundidade de carbonatação	53
Figura 4.5 - Variação da profundidade de carbonatação nas amostras com 0% de cloreto, em argamassas	54
Figura 4.6 - Variação da profundidade de carbonatação nas amostras com 0,4% de cloreto em argamassa	55
Figura 4.7 - Variação da profundidade de carbonatação nas amostras com 2,0% de teor cloreto em argamassa.....	56
Figura 4.8 - Corpos-de-prova prismáticos utilizados nas leituras eletroquímicas.....	57
Figura 4.9 - Eletrodo para leitura do potencial de corrosão.....	58
Figura 4.10 - Potencial de corrosão em corpos-de-prova com cimento CP II – F(0% de íons-cloreto)	59
Figura 4.11 - Potencial de corrosão em corpos-de-prova com cimento CP IV(0% de íons-cloreto)	60
Figura 4.12 - Potencial de corrosão em corpos-de-prova com cimento CP V (0% de íons-cloreto)	60
Figura 4.13 - Potencial de corrosão em corpos-de-prova com cimento CP II -F (0,4% íons cloreto).....	61
Figura 4.14 - Potencial de corrosão em corpos-de-prova com cimento CP IV (0,4% íons cloreto).....	61
Figura 4.15 - Potencial de corrosão em corpos-de-prova com cimento CP V (0,4% íons cloreto).....	62

Figura 4.16 - Potencial de corrosão em corpos-de-prova com cimento CP II (2% íons cloreto)	63
Figura 4.17 - Potencial de corrosão em corpos-de-prova com cimento CP IV (2% íons cloreto).....	63
Figura 4.18 - Potencial de corrosão em corpos-de-prova com cimento CP V (2% íons cloreto).	64
Figura 4.19 - Cloretos livres nas amostras contendo 0 % de cloretos em relação à massa do cimento	65
Figura 4.20 - Cloretos livres nas amostras contendo 0,4% de cloretos em relação à massa de cimento	66
Figura 4.21 - Cloretos livres nas amostras contendo 2% de cloretos em relação à massa de cimento	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Teor limite de cloretos	12
Tabela 3.1 - Caracterização da areia utilizada no programa experimental.	28
Tabela 3.2- Resultados da caracterização da areia	29
Tabela 3.3 - Caracterização da brita utilizada no programa experimental	30
Tabela 3.4 - Descrição dos cimentos	30
Tabela 3.5- Exigências Físicas e mecânicas dos cimentos, fornecida pela ABNT no Boletim 106.	31
Tabela 3.6 - Exigências químicas dos cimentos, fornecidos pela ABNT no Boletim 106.	31
Tabela 3.7 - Quantidade geral de corpos-de-prova por tipo de ensaio	35
Tabela 3.8 - Quantidade de material usado em cada traço de concreto por tipo de cimento.....	36
Tabela 3.9 - Quantidade de material usado em cada traço de concreto por tipo de cimento.....	37
Tabela 4.1 Caracterização mecânica do cimento CP II F – 32, moldados com íons-cloreto	47
Tabela 4.2 - Caracterização mecânica do cimento CP IV, moldados com íons-cloreto	48
Tabela 4.3 - Caracterização mecânica do cimento CPV – ARI, moldados com íons-cloreto	48

Tabela 4.4 - Resultados da esclerometria para os corpos de prova confeccionados com cimento CPII, com adição de cloretos	50
Tabela 4.5 - Resultados da esclerometria para os corpos de prova confeccionados com o cimento CP IV, com adição de cloreto.....	51
Tabela 4.6 - Resultados da esclerometria para os corpos de prova confeccionados com cimento CP V – ARI, com adição de cloreto.....	51
Tabela 4.7 - Critério para avaliação do potencial de corrosão (ASTM C 876- 09) ...	58

LISTA DE QUADROS

Quadro 4.1 – Profundidade de carbonatação em corpo de prova com 0% de teor de cloreto	54
Quadro 4.2 - Profundidade de carbonatação em corpos de prova com 0,4% de cloreto	55
Quadro 4.3 – Profundidade de carbonatação em corpos de prova com 2% de cloreto	56

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Ilustração 1 - Molde de 10cm x 20cm utilizado na preparação dos CP'S.....	76
Ilustração 2 - Molde de 5cm x 10cm utilizado na preparação dos CP'S.....	76
Ilustração 3 – Separação e pesagem do material para confecção do corpo de prova	77
Ilustração 4 – Moldagem dos corpos de prova no laboratório.....	77
Ilustração 5 – Formato do Aço tipo CA – 50 utilizado no experimento.....	78
Ilustração 6 – Detalhamento na preparação do corpo-de-prova prismático.....	78
Ilustração 7 – Forma utilizada para confecção de corpo-de-prova prismático.....	79
Ilustração 8 – Moldagem do corpo de prova prismático.....	79
Ilustração 9 – Preparação dos corpos de prova prismáticos para o tempo de cura..	80
Ilustração 10 – Os corpos de prova prismáticos no laboratório.....	80
Ilustração 11 – Preparação dos corpos-de-prova prismáticos para utilização nas leituras eletroquímicas.....	81
Ilustração 12 –Os corpos de prova prismático alojados no laboratório, utilizados nas leituras eletroquímicas.....	81
Ilustração 13 – Eletrodo- instrumento utilizado para leitura do potencial de corrosão	82
Ilustração 14 – Corpos de prova desmoldado.....	82
Ilustração 15 – Aferição através do Esclerômetro de reflexão do tipo SCHIMIDT	83
Ilustração 16 - Ensaio de resistência a compressão utilizando a Máquina Universal -.....	83
Ilustração 17 - Aplicação de solução de nitrato de prata nos corpos de prova	84

Ilustração 18 – Corpos de prova seccionados com diversos teores de cloretos	84
Ilustração 19 – Aferição da profundidade de carbonatação utilizando PAQUIMÉTRO	85

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	iv
RESUMO.....	v
ABSTRACT	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE QUADROS	xii
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	xiii
SUMÁRIO.....	xv
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Considerações iniciais	1
1.2 Objetivo geral.....	3
1.3 Objetivos específicos	3
1.4 Justificativa	4
1.6 Estrutura da dissertação	4
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	6
2.1 Corrosão das armaduras	6
2.2 Mecanismo da corrosão induzida por cloretos.....	8
2.2.1 Manifestações patológicas em estruturas de concreto armado	9
2.2.2 Classificação.....	9
2.2.3 Teor limite de cloretos	11

2.2.4	Penetração dos cloretos	13
2.2.5	Fatores que exercem influência na corrosão por cloretos	14
2.2.6	Fixação de cloretos.....	17
2.2.7	Ensaio para avaliar a resistência à carbonatação.....	17
2.3	Métodos para avaliação da presença de cloretos em concreto.....	18
2.3.1	Métodos qualitativos	19
2.3.1.1	Solução de nitrato de prata.....	21
2.3.1.2	Trabalhos realizados com a solução de nitrato de prata	22
3	METODOLOGIA USADA NO PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	25
3.1	Introdução ao método de aspersão do nitrato de prata	25
3.2	Descrição da metodologia	26
3.2.1	Variáveis dependentes	26
3.2.2	Variáveis independentes	27
3.3	Caracterização dos materiais	27
3.3.1	Areia	27
3.3.2	Brita	29
3.3.3	Cimentos	30
3.4	Armaduras	31
3.5	Água	32
3.6	Tipos e quantidades de corpos-de-prova.....	33
3.6.1	Concreto	35
3.6.2	Argamassa	37

3.7 Ensaio complementares.....	38
3.7.1 Caracterização físico-química dos cimentos	38
3.7.1.1 Cimento Portland (CP II-F-32).....	39
3.7.1.2 Cimento Portland pozolânico (CP IV-32).....	39
3.7.1.3 Cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI)	40
3.7.2 Resistência à compressão.....	40
3.7.3 Dureza superficial através do esclerômetro de reflexão	41
3.7.4 Profundidade de Carbonatação	42
3.7.5 Ensaio de aspersion de solução de nitrato de prata	43
4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	46
4.1 Ensaio de caracterização e complementares ao estudo.....	47
4.1.1 Ensaio de resistência à compressão.	47
4.1.2 Ensaio de esclerometria.	50
4.1.3 Profundidade de carbonatação.....	53
4.1.3.1 Amostras	53
4.2 Medidas eletroquímicas	57
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	67
5.1 Conclusões.....	67
5.1.1 Primeira Etapa	67
5.1.1.1 Amostras de referência contendo 0% íons cloreto	67
5.1.1.2 Amostras contendo 0,4% íons cloreto incorporados à massa	68
5.1.1.3 Amostras contendo 2,0% de cloretos incorporados à massa	68

5.1.2 Segunda Etapa.....	68
5.1.2.1 Amostras de referência	68
5.1.2.2 Amostras contendo 0,4% de cloretos incorporados à massa	69
5.1.2.3 Amostras contendo 2,0% de cloretos incorporados à massa	69
5.1.3 Aplicabilidade do método de aspersão de nitrato de prata	69
5.1.4 - Sensibilidade das técnicas estudadas ao teor de cloretos	70
5.2 Sugestões.....	71
• Sugestões técnicas	71
• Sugestões ambientais	71
REFERÊNCIAS.....	72
ANEXO.....	76

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

A indústria da Construção Civil no Brasil é uma das grandes responsáveis pelo crescimento do país, sendo o concreto armado largamente utilizado nas construções brasileiras. Desta forma, faz-se necessário a consideração da sua durabilidade, ou seja, o seu adequado desempenho durante a sua vida útil na avaliação de um projeto.

A principal preocupação no projeto e na execução das estruturas de concreto é oferecer segurança e estabilidade para o uso previsto no local sem que haja necessidade de constantes reparos e manutenções em estruturas com condições normais de conservação.

Nas últimas décadas a durabilidade das estruturas de concreto armado tem sido afetada por processos de deterioração, principalmente o da corrosão das armaduras.

Observa-se que nos últimos anos tem crescido o número de edificações cujas estruturas de concreto armado tem apresentado manifestações patológicas, principalmente relacionadas com a corrosão das armaduras.

A corrosão das armaduras é um fenômeno patológico que tem como principal agravante a redução de seção da barra e a perda de sua aderência no concreto, além da fissuração e posterior deslocamento do seu cobrimento em consequência da formação dos produtos de corrosão.

A corrosão das armaduras nas estruturas através do ingresso de íons cloreto é uma das formas mais comuns de ataque que leva à deterioração de estruturas de concreto armado.

A partir dos anos 80, o governo, a indústria e os pesquisadores brasileiros juntamente com as escolas de engenharia deram início a uma forte corrente no sentido de encontrar soluções para os graves problemas causados pela corrosão de armaduras.

Nos últimos anos, observa-se um aumento no número de congressos, comitês técnicos, reuniões especializadas no assunto e também as escolas de formação tecnológica em engenharia tem demonstrado uma grande preocupação na formação de seus membros, alertando que a corrosão de armaduras tem se tornado uma das mais sérias e onerosas manifestações patológicas em estruturas de concreto armado.

Como exemplo, Andrade,(1997) realizou, em Pernambuco, “extensa pesquisa em obras de concreto armado convencional; cabe, porém, ressaltar que a maioria das edificações estudadas estavam localizada na zona sob a ação de névoa salina”.

Nesta pesquisa se notou dados alarmantes de corrosão de armaduras, chegando a 61% de manifestações patológicas, conforme mostra a Figura 1.1.

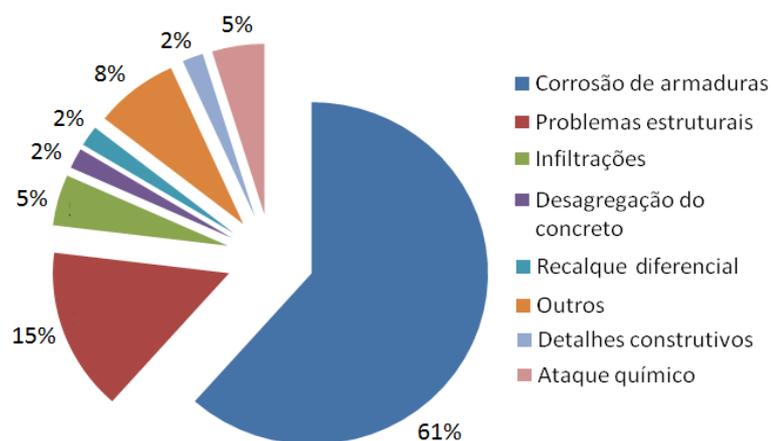


Figura 1.1 - Incidência de manifestações patológicas em estruturas de concreto armado no Estado de Pernambuco (Fonte: Andrade, 1997).

Andrade, (1992), por exemplo, “afirma que a situação mais agressiva, e também a responsável pelo maior número de casos de corrosão de armaduras é a presença de cloretos”.

Para se quantificar o teor de cloretos existentes em uma estrutura de concreto há inúmeros e complexos métodos analíticos, onerosos e demorados.

Surge a necessidade de buscar um método simples, rápido, barato e que permita conhecer o risco ou não de corrosão nas estruturas.

No momento, o método escolhido para ser avaliado com profundidade, é o de aspersão de nitrato de prata, e que sendo bem aplicado, venha a ser de grande relevância ao meio profissional de engenharia, por ser um método de fácil aplicação e rápido.

O Cimento Portland, apesar de ser um material mundialmente conhecido, ainda existe lacunas no conhecimento do seu comportamento ao longo do tempo, principalmente quanto à previsão da durabilidade dos concretos. Pouco se sabe sobre o comportamento dos produtos hidratados dos diferentes tipos de cimento Portland em interação com o meio ambiente.

Assim, reúnem-se nesta pesquisa dois pontos estratégicos para a realização dos trabalhos na área de durabilidade das estruturas de concreto armado:

- por um lado, tem-se o cloreto como agente causador da corrosão no aço;
- por outro lado, fez-se a avaliação da capacidade dos vários tipos de cimento Portland em combinar cloretos livres, através da técnica de aspersão de nitrato de prata.

1.2 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral a avaliação da presença de cloretos livres pelo método colorimétrico de aspersão de nitrato de prata em concreto e argamassas confeccionadas com cimento Portland CP II - Z - 32, CP IV- 32 e CP V – ARI.

1.3 Objetivos específicos

- Avaliar a eficiência do método de aspersão de nitrato de prata sobre matrizes de concreto confeccionadas com diferentes tipos de cimentos Portland e com aplicação de diferentes teores de cloretos;
- Analisar qual é a influência nas amostras de cada tipo de cimento no teor de cloreto livre e combinado;

- Mensurar a contaminação e a distribuição do íon cloreto nas amostras, tanto como cloreto livre e/ou como cloreto combinado;
- Verificar através de testes qual tipo de cimento é capaz de fixar mais rapidamente os cloretos incorporados em pasta de cimento através do método de aspersão de nitrato de prata.

1.4 Justificativa

Normalmente numa inspeção para se avaliar a corrosão de armaduras, é notório descobrir a sua causa e se faz necessários ensaios laboratoriais de teores de cloreto que são demorados e de elevado custo.

A justificativa para a realização dessa pesquisa é de avaliar a aplicabilidade do método de aspersão de nitrato de prata, realizado *in loco*, o qual de imediato será capaz de informar a presença ou não da contaminação por cloretos livres em material com os diversos tipos de cimento Portland.

Este método apresenta como vantagem a sua praticidade e, poderá ser utilizado com êxito por toda a comunidade técnica de engenharia.

- CAPÍTULO 3 - A metodologia usada no programa experimental, descrição os materiais, métodos e os tipos de corpos de prova utilizados na presente pesquisa.
- CAPÍTULO 4 – Apresentação e Discussão dos resultados.
- CAPÍTULO 5 – Conclusões e Sugestões.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os inúmeros estudos na área de corrosão das armaduras são justificados pela abrangência mundial dos problemas ocasionados e pela complexidade dos mecanismos de iniciação e propagação da corrosão.

São dignos de nota, os elevados recursos aplicados para reparar as estruturas atingidas, que posteriormente afetam danos sociais e ambientais envolvidos, uma vez que as construções na maioria dos países têm sido severamente atacadas pela corrosão.

2.1 Corrosão das armaduras

Para melhor entender o fenômeno da corrosão, serão relatados alguns conceitos básicos emitidos pelos pesquisadores.

A corrosão relatada por Gentil, (1996), “representa toda e qualquer alteração prejudicial e indesejável, sofrida pelo material, tal como: desgaste, variações químicas ou modificações estruturais”.

Ainda Gentil, (1996), “como a deterioração de um material, geralmente metálico, através de ação química ou eletroquímica do meio ambiente”. A corrosão de armaduras no concreto se dá pela destruição da película passivadora. A película passivadora pode ser descrita como uma camada invisível de óxidos que se forma após o início da hidratação do cimento e que se encontra firmemente aderida ao aço.

De acordo com Helene, (1993), “esta passividade gerada pelo filme de óxidos é uma barreira que dificulta a ocorrência da corrosão”.

A corrosão de armaduras no concreto de cimento Portland pode acontecer, essencialmente, por dois motivos principais:

- O primeiro é devido ao fenômeno da diminuição da alcalinidade do concreto, ocasionada principalmente pela carbonatação do concreto;

- O segundo, devido à presença de cloretos livres no concreto.

Muitos pesquisadores concordam que a corrosão induzida por cloretos é o tipo mais perigoso, pois, neste caso, os cloretos despassivam a armadura pontualmente, ainda que o pH esteja elevado, e formam pites, que reduzem a seção transversal da barra, diminuindo sua capacidade portante e, podem levar a estrutura ao colapso.

Os cloretos nos concretos e argamassas podem ser provenientes dos agregados, da água ou do solo contaminados, do aditivo acelerador de pega à base desse íon, dos sais de degelo, das atmosferas marinhas ou da ação direta da água do mar.

No entanto, independentemente da fonte que ocasiona a presença dos cloretos no concreto, estes vão estar na matriz da argamassa ou do concreto, nos diferentes estados a seguir listados (Figueiredo, (1994)):

- Quimicamente combinados, na forma de sal de Friedel (C-A-H), por reação com o C_3A do cimento Portland: C_3A , $CaCl_2$, e H_2O ;
- Quimicamente adsorvidos ao C-S-H;
- Livres na solução aquosa dos poros.

Não é todo cloreto incorporado ao concreto que causa a corrosão nas armaduras, porém o perigo se encontra nos cloretos que não estão sob a forma combinada com o C_3A do cimento, e sim, os cloretos livres que ficam na água dos poros do concreto, que causarão a corrosão.

Portanto, o tipo de cimento utilizado no concreto exerce grande influência no que tange ao tipo de agressão a que serão expostas às armaduras da estrutura de concreto.

O método de aspersão do nitrato de prata para verificar a presença e a profundidade de penetração dos cloretos no concreto tem sido empregado por alguns autores. Cabe salientar, porém, que os resultados obtidos ainda podem ser questionados, uma vez que ainda não se conhece a influência da composição do cimento e da carbonatação sobre os resultados deste método.

Otsuki et al. (1992) “fizeram uma avaliação do método de aspersão para medição da penetração de cloretos em materiais de matrizes cimentíceas”.

Collepari, (1972) empregou “o método colorimétrico para determinar o teor mínimo de cloretos livres que pode ser detectado pela solução de nitrato de prata, assim como o tempo necessário para que os cloretos livres sejam transformados em cloretos combinados”.

No que se refere à inspeção de estruturas contaminadas por cloretos, evidencia-se a seguir uma das maiores aplicações práticas e importantes do método estudado neste trabalho.

Para se quantificar o teor de cloretos existente em uma estrutura ou corpo-de-prova de concreto ou argamassa há inúmeros e complexos métodos analíticos, onerosos e demorados. Isto tem deixado tecnologistas, construtores, consultores técnicos e pesquisadores em estado de alerta.

Surge então a necessidade de aplicação de um método simples, rápido e que permita conhecer o risco ou não de corrosão nas estruturas.

O método, originalmente normalizado pela UNI 7928, (1978), sob o título “*Calcestruzzo: determinazione della penetrabilità dello ione cloruro,*” é um método colorimétrico, semelhante ao método de aspersão de fenolftaleína e timolftaleína sobre a superfície do concreto, para determinar qual é a profundidade de carbonatação, no qual determina-se a profundidade de penetração da frente de cloretos livres”.

2.2 Mecanismo da corrosão induzida por cloretos

Muitos pesquisadores, como Gentil, (1996), Helene,(1993), Collepari, (1972), e Otsuki, (1992), têm dedicado boa parte de seus estudos à área de durabilidade das estruturas de concreto. Isto se explica pelo surgimento de diversos problemas que vem ocorrendo nas estruturas, nos últimos anos, com bastante frequência.

A grande relevância destes estudos está, primeiramente, em saber de que maneira os danos aparecem e como evoluem.

Existem vários trabalhos publicados mundialmente a respeito da ocorrência de manifestações patológicas em estruturas de concreto armado, trabalhos estes que servem de embasamento para diagnosticar os danos ocorridos, assim com para alertar aos nossos pesquisadores sobre as manifestações patológicas mais acentuadas.

2.2.1 Manifestações patológicas em estruturas de concreto armado

As manifestações patológicas apontadas e analisadas no meio técnico-científico deve-se ter o cuidado de compará-las com outras manifestações do mesmo tipo ou semelhante, tentando sempre analisar as condições de soluções.

Manifestações patológicas que ocorrem nas obras de engenharia civil têm inúmeras causas. Tanto o macroclima (zona urbana, rural) quanto o microclima (ambientes internos ou externos e respectivos teores de umidade no concreto) influenciam estas manifestações patológicas.

2.2.2 Classificação

Sabe-se que a corrosão de armaduras de concreto é classificada segundo sua natureza como: química e eletroquímica:

- A corrosão de natureza química acontece através da reação gás-metal, na qual ocorre a formação de uma película de óxidos. Este processo é conhecido por ser lento, exceto quando o gás que entra em contato com o metal é muito agressivo.
- A corrosão de natureza eletroquímica só ocorre em meio aquoso, com a formação de uma pilha de corrosão, com um eletrólito que é formado a partir da umidade de equilíbrio ou que ingressa no concreto, onde ocorre diferença de potencial em determinados trechos da superfície do aço. É este tipo de corrosão que mais traz

problemas as obras de construção civil.

De acordo com a morfologia, a corrosão de armaduras pode ser classificada como se segue:

- a corrosão generalizada;
- a corrosão por pite;
- a corrosão sob tensão.

A Figura 2.1 apresenta um esquema no qual se pode visualizar a morfologia da corrosão de armaduras.

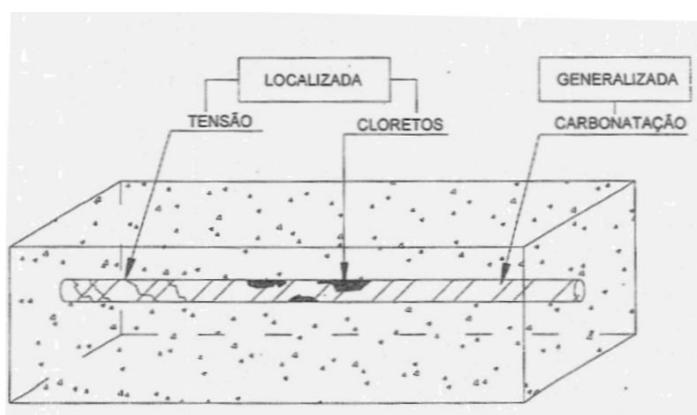


Figura 2.1 - Classificação da corrosão de armaduras de acordo a morfologia

A corrosão generalizada, como seu próprio nome mostra, ocorre de maneira generalizada na superfície do aço, podendo ser uniforme ou não e apresentando superfície rugosa e irregular;

A corrosão por pite ou corrosão puntiforme é localizada pontualmente, e podem-se observar pontos de desgaste na superfície do metal, que evoluem e se aprofundam;

A corrosão sob tensão também é uma corrosão localizada, mas ocorre simultaneamente com uma tensão de tração na armadura, podendo ocorrer a propagação da fissura no aço.

Com as idéias acima relatadas, pode-se dizer que são duas as principais causas que podem destruir a capa passivante de óxidos do aço e ocasionar sua corrosão:

- Presença de um teor suficiente de cloretos ou outros íons despassivantes em contato com a armadura;
- A diminuição da alcalinidade da solução dos poros do concreto por carbonatação ou reação com ácidos provenientes de ambientes agressivos.

No caso em estudo o tipo de corrosão que foi analisado foi a corrosão provocada pela presença de cloretos, que é a mais frequente na Cidade de Recife e nas Cidades litorâneas.

2.2.3 Teor limite de cloretos

Segundo Andrade, (1992), o teor limite de cloretos é função:

- do tipo de cimento (C_3A e C_4AF);
- do teor de cimento;
- da relação água/cimento (a/c);
- da porosidade do concreto;
- da umidade;
- da temperatura.

O teor de cloretos que podem vir a despassivar a película de óxidos da armadura ainda é motivo de controvérsia no meio técnico.

Para contornar esta controvérsia cada instituição procurou normalizar um teor, adotando um valor limite que deve ser condizente com a realidade de cada região.

Segundo Andrade, (1992), “ainda que os cloretos solúveis em água sejam os únicos que podem provocar a corrosão, é conveniente determinar os cloretos totais (somatório de cloretos livres e cloretos combinados) que ficam disponíveis para reações, devido aos fenômenos tais como a carbonatação ou elevação da temperatura”.

Rodrigues, (1994), afirma que “o risco da corrosão aumenta à medida que cresce a quantidade de cloretos, ou seja, quando o teor de cloretos ao nível das armaduras excede teor limite, ocorre então o desencadeamento do processo corrosivo”.

Na Tabela 2.1 é apresentada uma breve compilação das principais normas mundiais em relação ao teor máximo de cloretos permitidos no concreto sem que haja prejuízos às armaduras.

Tabela 2.1 - Teor limite de cloretos

NORMA	PAÍS	ANO	TEOR DE CLORETOS RECOMENDADO
			≤ 0,15% em relação ao peso de cimento, em ambiente com cloretos
ACI 31 BR-21	EUA	2001	≤ 0,3% em relação ao peso de cimento, em ambiente normal ≤ 1% em relação ao peso de cimento, em ambiente seco
CEB	Europa	1991	
ENV 206	Portugal	1991	0,40% em relação ao peso de cimento
BS 8110:1	Inglaterra	1985	
JCSE-SP2	Japão	1986	≤ 0,60 kg/m ³ em relação a 1 m ³ de concreto
NBR 6118	Brasil	1978	500 mg/l em relação à água de amassamento
NBR 6118	Brasil	2004	Não se reporta ao teor de cloretos

Pode-se verificar na Tabela 2.1 que o teor limite de cloretos não é definido de maneira generalizada para os diversos países, como também não são iguais suas condições técnicas e ambientais. Portanto, é consenso entre os pesquisadores que o principal fator controlador da despassivação das armaduras é a relação Cl^- / OH^- . Esta relação influencia a corrosão, ou seja, quanto maior a concentração de hidroxila (OH^-), mais íons cloretos livres temos no concreto.

A NBR 6118 (2009), não fixa limite, apenas diz no Capítulo 9.3.2: “mecanismos preponderantes de deterioração relativa à armadura, despassivação por elevado teor de íons cloretos, ou seja, por penetração de cloretos através de processo de difusão de impregnação ou de absorção capilar de águas contendo teores de cloreto, que superarem, na solução dos poros de concreto, em certo limite

em relação à concentração de hidroxilas, despassivam a superfície do aço e instalam a corrosão”.

2.2.4 Penetração dos cloretos

Os íons cloreto podem penetrar nas estruturas do concreto e da argamassa devido ao uso de sais de degelo, contato com a água do mar, atmosfera industrial e ambiente marinho, dentre outras maneiras. Esta ação afeta as obras construtivas, como também as obras de arte e monumentos, principalmente os países de inverno rigoroso.

Helene, (1993), afirma que “os cloretos potencialmente agressivos são aqueles que se encontram dissolvidos em água, uma vez que o cristal sólido não penetra na porosidade do concreto. Como sólidos, porém, os cristais de cloretos podem se depositar na superfície do concreto até que chuvas os dissolvam e os transportem ao interior do concreto”.

E ainda, segundo Helene, “a determinação do teor de cloretos totais, proporciona a avaliação do grau de contaminação do concreto de forma comparativa, pois praticamente todas as normas estabelecem o limite de cloretos em termos de cloretos totais”.

Os mecanismos de ingresso e transporte dos íons cloreto nas estruturas de concreto, se projetam pelos poros ou pelas fissuras no concreto, sendo os principais tipos, a saber: absorção capilar; permeabilidade; migração iônica e difusão iônica.

No Brasil, a maioria das capitais está situada em região marinha e as estruturas de concreto armado são agredidas com bastante intensidade pelos cloretos existentes no meio ambiente e que termina sendo carregado através da chuva salinizada, da névoa ou água do mar, e, como também pelos serviços de lavagem de fachadas e pisos, onde certas empresas utilizam materiais não adequados, como exemplo, o ácido muriático.

Em Recife, por exemplo, onde o clima é úmido, a situação é mais grave ainda, pois à medida que as estruturas secas são umedecidas por água salinizada, ocorre absorção, dessas águas que preenchem os poros do concreto e quando

ocorre a evaporação, a água pura é evaporada e os sais cristalizados vão ficando na estrutura e nesse processo, cada vez mais sais penetram no concreto vindo a saturá-lo. Esse ciclo termina contribuindo para a saturação do concreto.

2.2.5 Fatores que exercem influência na corrosão por cloretos

Os principais fatores que determinam ou influenciam a ação dos cloretos sobre a corrosão das armaduras das estruturas de concreto são:

- o tipo de cimento:

Os diferentes tipos de cimento apresentam variação de suas composições e finura contribuindo de forma diferente na capacidade de proteção à armadura. A começar, o tipo de cimento empregado na execução do concreto utilizado na construção diariamente pode exercer influência sobre o processo de corrosão, em decorrência do seu teor original de C_3A e C_4AF , que são os compostos capazes de fixar os cloretos.

Page et. al. (1986) “dizem que a quantidade de C_2A do cimento tem influência na iniciação da corrosão pelos cloretos, visto que este componente do cimento é responsável pela formação do cloroaluminato de cálcio hidratado, também conhecido como Sal de Friedel, o qual, ao fixar os íons cloreto, contribui para a diminuição da concentração de cloretos livres na solução contida nos poros do concreto”.

Schiessi, (1987), “afirma que concretos com cimento Portland com pouco C_2A são, particularmente, desfavoráveis no que tange à difusão dos íons cloretos, pois tem uma baixa capacidade de fixação dos cloretos se comprado a concretos feitos com cimento Portland comum ou cimento com adições”.

Ainda, Page (1986), “afirma que um dos aspectos que impedem o processo da despassivação de armadura é a capacidade que certos cimentos, contendo escória ou pozolana, tem em restringir a mobilidade dos íons dentro da matriz do concreto e conferir relativa

durabilidade às armaduras de concretos expostos a ambientes com cloretos. Isto ocorre porque estes cimentos podem reuzir substancialmente a permeabilidade do concreto, aumentando consequentemente, a resistividade elétrica, especialmente se houver possibilidade de redução da relação água/cimento”.

A escória possui um teor de aluminatos superior em relação ao clínquer, sendo que, deste modo, o cimento com escória apresenta capacidade de fixação de cloretos potencialmente superior, em relação ao cimento sem adição de escória(Bauer & Helene, 1998).

Como se pode observar o uso de adições minerais ao cimento é benéfico quando se trata de impedir a entrada da frente de cloretos. Em outras palavras, os cimentos compostos apresentam desempenho aceitável quando se trata de impedir a difusão dos cloretos na matriz do concreto. Porém, sabe-se que isto só é verdade quando os corpos-de-prova ou estruturas analisados já possuem certa idade.

- o tipo de aço:

O tipo de aço utilizado como armadura no concreto exerce certa influência sobre a corrosão.

Silva et. AL. (1995), “afirma que aços que possuem maior entropia, classe B, possuem maior vulnerabilidade ao desenvolvimento de processos corrosivos.

- a temperatura:

A temperatura tem papel muito importante na corrosão induzida por cloretos, uma vez que promove uma elevação na mobilidade dos íons cloreto, aumentando desta forma a velocidade de corrosão do aço.

AL-khaja (1997) “ em pesquisa realizada para saber qual a influência da temperatura na penetração de cloretos em concreto convencional e concreto de alto desempenho concluiu que o efeito da temperatura no ingresso de cloretos é maior no coreto convencional que no concreto de alto desempenho”.

Neville (1997) “ concorda que quando ocorre aumento de temperatura do concreto o teor de cloretos livres na água dos poros também aumenta”.

- o cobrimento:

o cobrimento do concreto sobre a armadura do concreto constitui uma barreira física à entrada de agentes agressivos, umidade e oxigênio. Porém, o cobrimento também atua como barreira química gerada pelo ambiente alcalino do concreto. Este ambiente alcalino é produzido através das reações de hidratação dos silicatos de cálcio que liberam os hidróxidos de cálcio na pasta do concreto.

O cobrimento das armaduras deve ter alta compacidade, teor de argamassa adequado e homogêneo, que possa gerar à armadura a proteção contra os agentes agressivos, atuando desta maneira como barreira física.

O pH da solução dos poros do concreto deve estar acima de 12 e em ausência de íons cloreto, de acordo com Mehta & Monteiro (1994), para que se possa dizer que a armadura encontra-se passivada, cumprindo desta forma o caráter químico.

De acordo com Neville (1997) “ a prevenção de corrosão induzida por cloretos pode ser realizada através do controle da entrada destes íons pela espessura do cobrimento, isto é, pela diminuição de permeabilidade do concreto de cobrimento”.

- a carbonatação:

O fenômeno da carbonatação é um fator inevitável às estruturas expostas ao ar. Assim sendo, todas as estruturas ao ar se carbonatam, com maior ou menor intensidade, dependendo da localidade.

A carbonatação é um fenômeno é um fator preponderante no desencadeamento da corrosão das estruturas de concreto armado. Apesar de que, o fenômeno vem sendo estudados há mais de três décadas, os problemas decorrentes continuam acontecendo em larga escala. O uso de concretos mais adequados, de maior resistência e

menor porosidade, e comprimentos compatíveis com as condições de exposição, previstos em referencial normativo adequado, são os elementos efetivos para o controle da carbonatação (Sierra & Souza, 1998).

2.2.6 Fixação de cloretos

O concreto deve proporcionar à armadura proteção física e química para que tenha durabilidade. A barreira física, também conhecida como cobrimento, será discutida posteriormente.

A barreira química, todavia, é dada pela fase da solução existente nos poros do concreto, que deve ser alcalina, para proporcionar a formação do chamado filme passivante sobre a armadura. Qualquer defeito causado neste filme passivante, por carbonatação ou pela presença de quantidade significativa de íons cloretos, pode estimular a corrosão.

Ollivier, (1998) afirma “que a fixação dos cloretos é diretamente influenciada por vários parâmetros”, como:

- a concentração de cloretos livres na solução dos poros;
- o teor de aglomerante;
- a área específica da pasta de cimento hidratado.

Atualmente, existem algumas técnicas de fixar os cloretos no concreto, ou seja, de não deixá-los livres para causar corrosão. Uma destas técnicas é o uso de óxido de alumínio como aditivo ao concreto.

2.2.7 Ensaio para avaliar a resistência à carbonatação

A resistência à carbonatação é verificada *in loco* através de indicadores químicos à base de solução de fenolftaleína, timolftaleína ou outro produto que indique a mudança de pH entre 8 e 11. O pH de mudança de cor da fenolftaleína é de 8,3 a 10, acima do qual torna-se vermelho-carmim e incolor abaixo desta faixa.

Por outro lado, o pH de mudança de cor da timolftaleína é de 8,3 a 10,5, acima do qual torna-se azul escuro e incolor abaixo desta faixa.

De acordo com as recomendações da RILEM, CPC 18 (1988), a solução de ambos os indicadores, fenolftaleína e timolftaleína, que foi preparada no laboratório da Universidade Católica de Pernambuco, obtida através da dissolução de 1 g de reagente em 99 g de álcool etílico. No caso da fenolftaleína, porém, é comum o uso de uma solução mais econômica de 1 g de reagente em 49 g de álcool etílico e 50 g de água.

A profundidade de carbonatação é expressa em mm ou cm e, na maior parte dos casos, é tomado um valor médio representativo da amostra.

2.3 Métodos para avaliação da presença de cloretos em concreto

Os íons cloreto podem se encontrar na matriz de concreto ou argamassa em duas formas: livres na água dos poros e/ou combinados C_3A e o C_4AF do cimento, formando os cloroaluminatos e cloroferratos. O conjunto de cloretos livres e cloretos combinados são chamados de cloretos totais”.

É consenso entre os pesquisadores como Andrade, (1992), Helene, (1993), e Figueiredo (1994): “que apenas os cloretos livres são os agentes nocivos à armadura”.

Os cloretos combinados na forma de cloroaluminatos e cloroferratos, podem tornar-se livres através de reações, como, por exemplo, a carbonatação devido à elevação da temperatura do concreto.

Apesar da corrosão ocasionada pela carbonatação de ser a mais comum nas estruturas de concreto armado, porém a corrosão induzida por cloretos proporciona um ataque mais severo às armaduras.

Devido à importância e necessidade de avaliar a presença dos íons cloreto no concreto e na argamassa, existem diferentes métodos de análises, alguns deles baseiam-se em análises qualitativas e outros em análises quantitativas.

É importante que se conheça a abrangência destes métodos para proceder

sua aplicação com segurança e em tempo hábil para uma devida conclusão.

A escolha de um método, em determinada ocasião, irá depender do propósito a que se destina a análise, da exatidão e o tempo dos seus resultados, o tempo necessário à aplicação, como também, não podemos deixar de observar a existência de equipamentos adequados e pessoal especializado na sua aplicação.

2.3.1 Métodos qualitativos

A aplicação dos métodos qualitativos serve para determinação de cloretos em concretos e argamassas, baseados na aplicação de indicadores químicos que, em presença de cloretos, apresentam mudança em sua coloração.

Estes métodos são de grande auxílio, principalmente quando deseja-se saber se há cloretos na estrutura, antes de proceder ao envio de amostras para ensaios laboratoriais, que são dispendiosos e demorados.

Existem diversas substâncias comumente usadas em testes de detecção de cloretos por indicadores químicos. Escolhendo então, um desses indicadores, já mencionado, faremos um estudo detalhado sobre a utilização do método de aplicação *in loco* para detecção de cloretos, baseado na aspensão de nitrato de prata.

O método de aspensão de nitrato de prata para verificação de cloretos em amostras de argamassas e concretos foi desenvolvido pelo Dr. Mario Collepari em 1970.

É um método qualitativo que indica a presença dos cloretos livres em estruturas nas amostras de concreto e argamassas.

Além de ser um método rápido e barato, pode ser usado para determinar o tempo alcançado para que os cloretos livres dos ingredientes das misturas se transformem em cloretos combinados.

A principal aplicação do método, porém, deve ser a determinação da espessura que os cloretos penetram por difusão em amostras de concreto ou estruturas permanentemente expostas a solução aquosa de cloretos.

Quando a solução de nitrato de prata é aspergida na superfície do concreto,

ocorre uma reação fotoquímica. Esta reação somente ocorre em presença de luz ou é catalisada pela mesma.

Onde há presença de cloretos livres ocorre a formação de um precipitado branco denominado cloreto de prata; onde porém os cloretos encontram-se na forma combinada, ocorre a formação de um precipitado marrom, o óxido de prata.

Como ambas as cores são bem contrastantes, branco e marrom, pode-se então observar claramente a área afetada pelos cloretos.

Como a frente de penetração de cloretos não é uniforme, isto pode mascarar as medidas de profundidade de ingresso de cloretos. Desde modo é importante a realização de várias medidas ao longo da estrutura ou corpo-de-prova, de modo que sejam evitados erros grosseiros na leitura da profundidade alcançada pelos cloretos, conforme Figura 2.2.

No caso em que os cloretos estão inseridos na matriz do concreto (acelerador de pega à base de cloretos), a visualização pode tornar-se um pouco mais difícil.

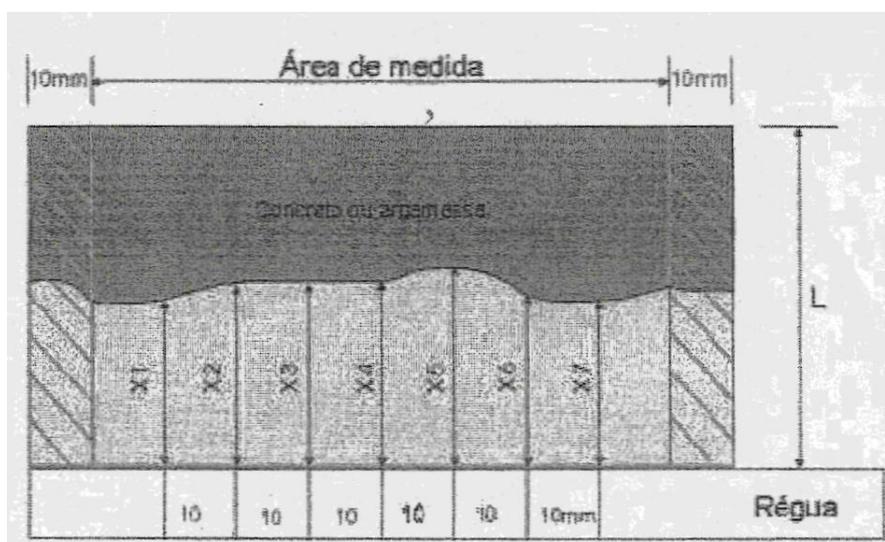


Figura 2.2 - Frente de penetração de cloretos (NT BUILD 492 (2000))

A NT BUILD 492 (2000) recomenda que na realização do ensaio com o método colorimétrico de aspersão de nitrato de prata deve-se sempre tomar sete medidas para no fim copilar uma média.

Além disto, para evitar o efeito parede, se deve evitar medidas de profundidades menores que 10 mm das bordas.

Existem casos que os agregados graúdos impedem a medida de profundidade de cloretos. Neste aspecto, a NT BUILD 492 (2000), recomenda que se deve alterar a medida junto à frente, onde não é significativa, por causa do bloqueio do agregado, ou mesmo ignorar esta profundidade se há mais que cinco medidas de profundidades válidas.

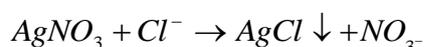
2.3.1.1 Solução de nitrato de prata

O nitrato de prata é facilmente solúvel em água. Uma vez preparada a solução de nitrato de prata, ela deverá permanecer em frasco escuro para evitar decomposição pela luz (redução fotoquímica). Devem ser evitados, portanto: calor, luz, fontes de ignição e contaminantes.

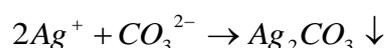
A solução de nitrato de prata é cáustica e irritante à pele e mucosas. Se inalada, pode provocar problemas gástricos fatais. Deste modo, a pessoa que for fazer uso desta solução deverá ter cuidados com a sua manipulação.

Uma vez aspergida no concreto ou na argamassa contaminada por cloretos, a solução de nitrato de prata reage com eles, formando um precipitado branco e floculento de cloreto de prata (AgCl).

A reação entre os íons cloreto do concreto e/ou da argamassa com a solução de nitrato de prata pode ser observada na equação abaixo.



Observou-se, todavia, que mesmo em concreto ou argamassa sem cloretos, porém já carbonatado, há formação de um precipitado branco de carbonato de prata, como ilustra a equação abaixo.



Conclui-se, portanto, que o método colorimétrico de aspersão de nitrato de prata é sensível aos cloretos livres e também ao carbonato de cálcio, produto da carbonatação.

Existem outras substâncias, além dos cloretos, que podem reagir com a solução de nitrato de prata, tais como amônia, álcalis, sal de antimônio, arsênico, brometos, carbonatos, sulfatos, iodetos, sais de ferro, fosfatos, ácido tânico e tartaratos.

A realcalinização do concreto ou da argamassa deve ser empregada principalmente quando se deseja saber a frente de penetração dos cloretos em estruturas que são submetidas a ciclos de molhagem e secagem.

2.3.1.2 Trabalhos realizados com a solução de nitrato de prata

Este método com aplicação da solução de nitrato de prata que foi desenvolvido na década de 70, somente agora está despertando um maior interesse aos pesquisadores. Apesar de existirem poucas pesquisas sobre o método colorimétrico de aspersão de nitrato de prata, porém já existem respostas para certos questionamentos importantes, principalmente no que diz respeito à utilização e aplicabilidade deste método.

Um fator que é muito discutido a respeito do método de aspersão de nitrato de prata é a questão do teor de cloretos que indica a formação do precipitado branco de cloreto de prata (indicação da presença de cloretos livres).

Na pesquisa de Andrade et al. (1999), “a concentração de cloretos que indica que há cloretos livres é de $1,13 \pm 1,4$ % de cloretos totais em relação à massa de cimento, com a margem de 95% de segurança”.

Já na pesquisa de Otsuki et al. (1992), o teor limite de cloretos que indica a existência de cloretos livres é de aproximadamente 0,15 % em relação à massa do cimento, como ilustra a Figura 2.3;

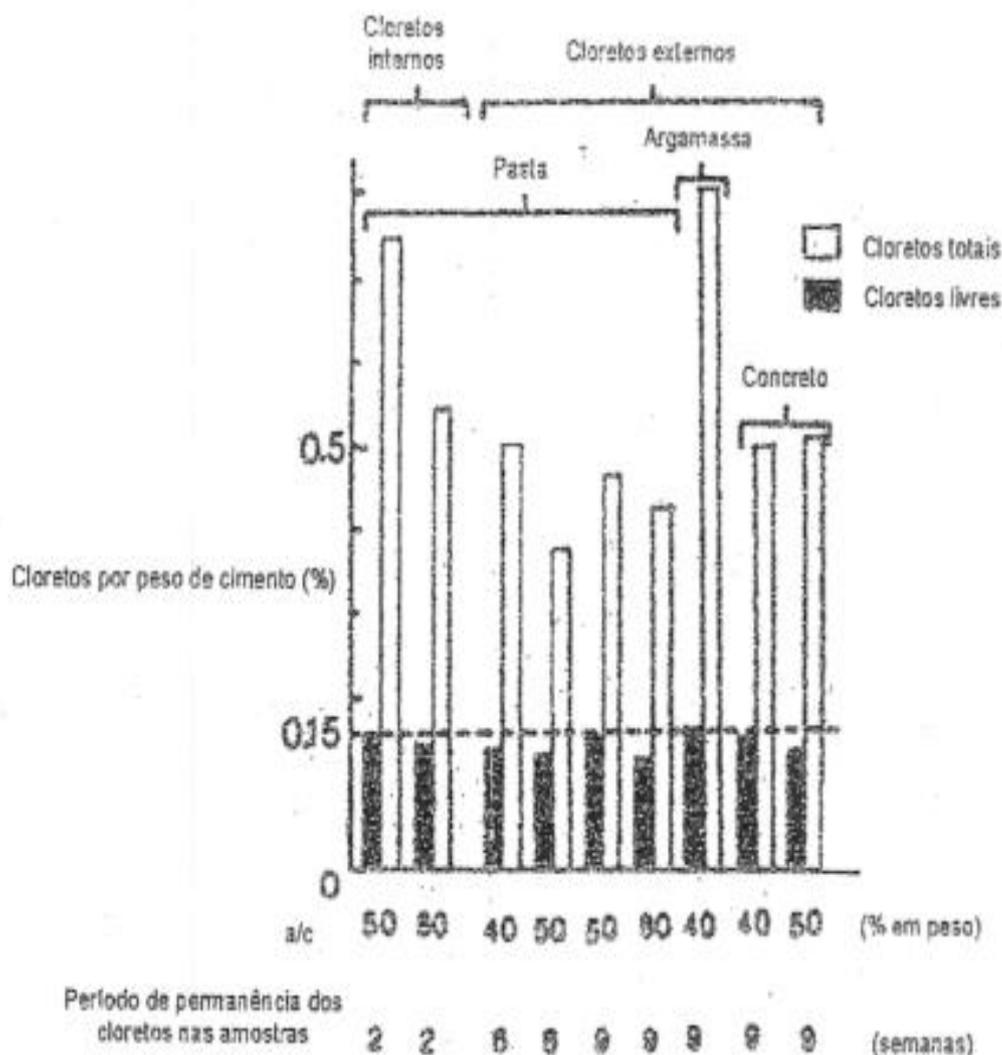


Figura 2.3 – Relação entre cloretos totais, livres e fator água /cimento de concretos, argamassas e pastas de cimento (Otsuki *et al.*,1992)

Todavia Collepardi (1997) “ afirma que o método colorimétrico pode ser usado para avaliar cloretos livres desde que o teor de cloretos seja maior que 0,0012% em relação à massa do concreto que corresponde a 0,01 % em relação à massa do cimento.

Outro aspecto que desperta curiosidade é a questão de qual teor de cloretos pode ser combinado ao C_3S e C_4AF do cimento. Neste sentido, Collepardi (1997), afirma que até mesmo altas porcentagens de cloretos, 0,6 % em relação ao peso de cimento, são completamente convertidas na forma combinada em até 28 dias.

Andrade et. al.. (1999), fizeram um estudo similar ao proposto nesta pesquisa, onde o objeto principal de estudo era a aplicabilidade do método colorimétrico de aspersão de nitrato de prata. Os autores observaram que concretos com sílica ativa obtiveram melhores desempenhos que o concreto sem adições de minerais ou concreto com escória de alto-forno.

O Método de aspersão de nitrato de prata foi retirado do mesmo em junho de 2000 após compara com os testes interlaboratoriais.

Segundo Colombo (2001), “o método não apresentou resultados seguros e por esta razão, a norma “UNI-7928” foi retirada do mercado”.

3 METODOLOGIA USADA NO PROGRAMA EXPERIMENTAL

O método de aspersão de nitrato de prata é também conhecido como método colorimétrico para determinação de cloretos livres ou como método rápido para determinação de cloretos livres e combinados no concreto.

Para a realização deste estudo foram confeccionados 180 corpos-de-prova (CP's) cilíndricos de argamassas, 36 corpos-de-prova prismáticos de argamassa e 36 corpos-de-prova cilíndricos de concreto, variando o tipo de cimento utilizado e os diversos teores de cloretos, a saber:

- Cimento Portland CP II 32;
- Cimento Portland CP IV 32;
- Cimento Portland CP V ;
- Teores de cloretos adicionados na água de amaciamento: 0%, 0,4% e 2%.

Na confecção dos CP's foram utilizados materiais comumente utilizados nas obras de engenharia e disponíveis nos armazéns da Região Metropolitana do Recife, com aplicação de ensaios para verificar a existência de cloretos livres ou combinados nos corpos-prova.

3.1 Introdução ao método de aspersão do nitrato de prata

A maneira de aplicação do referido método foi descrita na norma italiana UNI 7928 (1970) "Determinazione della penetrabilità dello tone cloruro", publicada pela instituição normalizadora, UNI - Unificazione Nazionale Italiana.

Pode-se dizer que o método colorimétrico de aspersão de nitrato de prata é bem similar ao método de aspersão de fenolftaleína para determinação da frente de carbonatação do concreto ou argamassa.

Porém, existem alguns aspectos resultantes da aplicação no método de aspersão de nitrato de prata que devem ser melhor esclarecidos.

Com a aplicação do método do nitrato de prata é possível a realização de uma avaliação qualitativa da presença de cloretos livres no concreto e na argamassa. Em outras palavras, o método colorimétrico acusa a presença de cloretos livres e combinados, não quantificando seus teores.

3.2 Descrição da metodologia

A metodologia utilizada está fundamentada no objetivo principal desta pesquisa que é a verificação da aplicabilidade e eficiência do método colorimétrico de aspersão de nitrato de prata em materiais à base de cimento Portland.

O ensaio colorimétrico de aspersão de nitrato de prata foi realizado de acordo com os procedimentos estabelecidos pela UNI 7928 (1970). Paralelamente à realização deste ensaio, foram realizados ensaios eletroquímicos com o objetivo de avaliar e garantir a eficiência do método de aspersão de nitrato de prata.

Medidas de profundidade de carbonatação também foram realizadas a fim de estabelecer uma relação entre a profundidade carbonatada e a presença de precipitados brancos visualizados na região periférica dos corpos-de-prova.

A presente metodologia também esta composta por ensaios de resistência à compressão. Estes ensaios, juntamente com os ensaios de caracterização físico-química dos cimentos e os ensaios de profundidade de carbonatação são denominados ensaios complementares.

3.2.1. Variáveis dependentes

As variáveis dependentes consideradas na referente pesquisa são as listadas a seguir:

- Porcentagem de precipitados brancos, formados após a aplicação da solução de nitrato de prata, em relação às partes seccionadas do corpo-de-prova;

- Potencial de corrosão (Ecorr);
- Esclerometria;
- Profundidade de carbonatação (E_{CO_2});
- Resistência à compressão.

3.2.2 Variáveis independentes

As variáveis independentes desta pesquisa são aquelas inerentes à constituição do concreto e da argamassa. São elas:

- Relação água/cimento;
- Idade dos ensaios;
- Teor de cloretos adicionados à massa do concreto e da argamassa;
- Tipos de cimentos empregados;
- Tipos de agregados graúdos e miúdos empregados;
- Tempo de cura.

3.3 Caracterização dos materiais

3.3.1 Areia

A areia utilizada como agregado miúdo nesta pesquisa é natural de leito de rio, proveniente da Região Metropolitana do Recife.

Foram realizados ensaios de caracterização levando em consideração os seguintes ensaios:

- Granulometria do agregado miúdo – NBR NM 248:(2003).
- Massa específica e massa específica aparente – NBR NM 52:(2009)

- Teor de argila em torrões – NBR 7218:(2010)
- Determinação de materiais finos – NBR NM 46:(2003)
- Determinação da massa unitária – NBR NM 45:(2006)
- Inchamento do agregado miúdo – NBR 6467:(2009)

A composição granulométrica da areia usada no presente trabalho é apresentada na Tabela 3.1 e na Figura 3.1 e os resultados dos ensaios de caracterização do agregado miúdo constam na Tabela 3.2.

Tabela 3.1 - Caracterização da areia utilizada no programa experimental.

Abertura Das Peneiras (mm)	Massa retida (%)		Variação das % Retidas ≤ 4 %	M e d i a d a s m a s s a s r e t i d a s (%)	M a s s a r e t i d a a c u m u l a d a (%)	Faixas em relação as % retidas acumuladas			
	Ensaio n° 1	Ensaio n° 2				Limites Inferiores		Limites Superiores	
						Zona Utilizável	Zona Ótima	Zona Utilizável	Zona Ótima
9,5	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0	0	0	0
6,3	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0	0	0	7
4,75	1,2%	1,0%	0,2%	1,1%	1,0%	0	0	5	10
2,36	7,1%	5,3%	1,8%	6,2%	7%	0	10	20	25
1,18	12,9%	13,3%	0,4%	13,1%	20%	5	20	30	50
0,6	21,1%	23,1%	2,0%	22,1%	42%	15	35	55	70
0,3	28,2%	31,7%	3,5%	30,0%	72,0%	50	65	85	95
0,15	23,3%	20%	3,3%	21,7%	94,0%	85	90	95	100
Fundo	6,2%	9,5%	3,3%	Módulo de finura =	2,36	Dimensão máxima característica (mm) = 2,4			

De acordo com os limites estabelecidos pela NBR 7211:(2009), a composição granulométrica da areia em questão enquadra-se na zona de classificação, como sendo uma areia grossa.

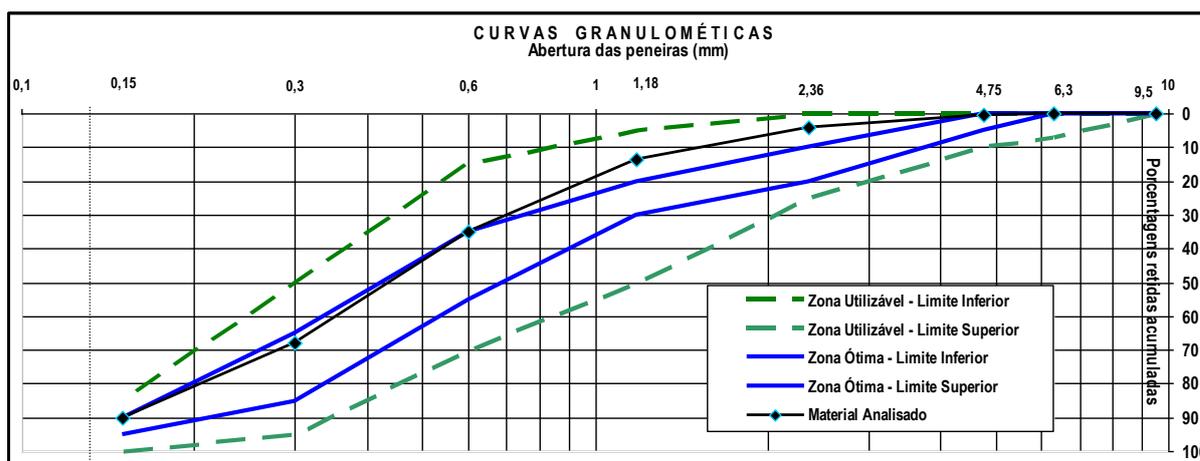


Figura 3.1 - Curva granulométrica do agregado

Tabela 3.2- Resultados da caracterização da areia

Massa Específica (g/cm ³)	Torrões de argila (%)	Materiais Finos (%)	Massa unitária seca (kg/m ³)	Inchamento	
				Inchamento (%)	Umidade Crítica %
2,62	0,0%	4,4%	1450	1,23	3,20
NBR 9776	NBR 7218	NBR NM 46	NBRNM45	NBR 6467	

3.3.2 Brita

O agregado graúdo utilizado no programa experimental foi a pedra britada, de dimensão máxima característica 19 mm, granulação, segundo a NBR 7211(2009).

Foram realizados ainda ensaios de distribuição granulométrica, de acordo com a NBR NM 248(2003), massa unitária, de acordo com a NBR NM 45:2006 e massa específica, de acordo com a NBR NM 53(2003). Os resultados podem ser visualizados na Tabela 3.3

Tabela 3.3 - Caracterização da brita utilizada no programa experimental

ABERTURA DAS PENEIRAS (MM)	MASSAS RETIDAS (G)	% RETIDA SIMPLES	% RETIDA ACUMULADA
19	174	1,74	1,74
12,7	5128	51,28	53,02
12,7	5128	51,28	53,02
9,5	2519	25,19	78,21
4,8	1063	10,63	88,84
2,4	409	4,09	92,93
< 2,4	707	7,07	100,00
Dimensão Máxima Característica		19 mm	
Módulo de Finura		6,62 mm	
Massa Específica		2,77 g/cm ³	
Massa Unitária		1,55 g/cm ³	

3.3.3 Cimentos

No programa experimental foram usados três tipos distintos de cimento: CP II F-32, CP IV e CP V-ARI, quanto à capacidade de fixação diferenciada de cada cimento em fixar cloretos. A Tabela 3.4 apresenta uma breve descrição dos cimentos Portland usados na pesquisa, de acordo com a ABNT.

Tabela 3.4 - Descrição dos cimentos

SIGLA	NOMENCLATURA DE ACORDO COM A ABNT
CP II-F-32	Cimento Portland composto com filler (NBR 11578:1997)
CP IV-32	Cimento Portland Pozolânico (NBR 5736:1999)
CP V-ARI	Cimento Portland de alta resistência inicial (NBR 5733:1991)

Todos os tipos de cimento mencionados são regidos por normas da ABNT.

O armazenamento dos sacos de cimento utilizados nesta pesquisa seguiu as recomendações da ABNT.

As características físico-químicas dos cimentos mencionados nas Tabelas

3.5 e 3.6 são importantes nesta pesquisa, uma vez que tal informação é fundamental para a discussão da capacidade de fixação dos cloretos e para a avaliação da eficiência do método de aspersão de solução de nitrato de prata.

Tabela 3.5- Exigências Físicas e mecânicas dos cimentos, fornecida pela ABNT no Boletim 106.

Tipo de cimento portland	Classe	Finura		Tempos de pega		Expansibilidade		Resistência à compressão				
		Resíduo na peneira 75 mm (%)	Área específica (m ² /kg)	Início (h)	Fim (h)	A frio (mm)	A quente (mm)	1 dia (Mpa)	3 dias (Mpa)	7 dias (Mpa)	28 dias (Mpa)	91 dias (Mpa)
CP II-F	32	≤ 12,0	≥ 260	≥ 1	≤ 10 ⁽¹⁾	≤ 5 ⁽¹⁾	≤ 5	-	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0	-
CP IV	32	≤ 8,0	-	≥ 1	≤ 12 ⁽¹⁾	≤ 5 ⁽¹⁾	≤ 5	-	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0	≥ 40,0 ⁽¹⁾
CP V-ARI		≤ 6,0	≥ 300	≥ 1	≤ 10 ⁽¹⁾	≤ 5 ⁽¹⁾	≤ 5	14,0	≥ 24,0	≥ 34,0	-	-

Tabela 3.6 - Exigências químicas dos cimentos, fornecidos pela ABNT no Boletim 106.

Tipo de Cimento Portland	Resíduo insolúvel(%)	Perda ao fogo(%)	MgO(%)	SO ₃ (%)	CO ₂ (%)	S(%)
CP II-F	≤ 2,5	≤ 6,5	≤ 6,5	≤ 4,0	≤ 5,0	-
CP IV	-	≤ 4,5	≤ 6,5	≤ 4,0	≤ 3,0	-
CP V-ARI	≤ 1,0	≤ 4,5	≤ 6,5	-	≤ 3,0	-

A Tabela 3.5 e 3.6 mostra as exigências de caracterização física e química dos cimentos, fornecidos pela Associação Brasileira de Cimento Portland, no Boletim Técnico (BT 106). São Paulo, (2002), sendo analisado no programa experimental, de maneira que estas exigências auxiliassem nas discussões sobre fixação de cloretos, assim como a carbonatação.

Ressalta-se ainda que o cimento CP IV-32 foi o cimento que revelou maior quantidade de aluminato que, conforme estudado na literatura é o componente responsável pela fixação dos cloretos.

3.4 Armaduras

Os corpos-de-prova prismáticos destinados às medidas eletroquímicas foram

armados com o aço tipo CA – 50, conforme podemos observar nas Figuras 3.2 e 3.3 abaixo:



Figura 3.2 - Formato do aço tipo CA - 50 utilizados no experimento

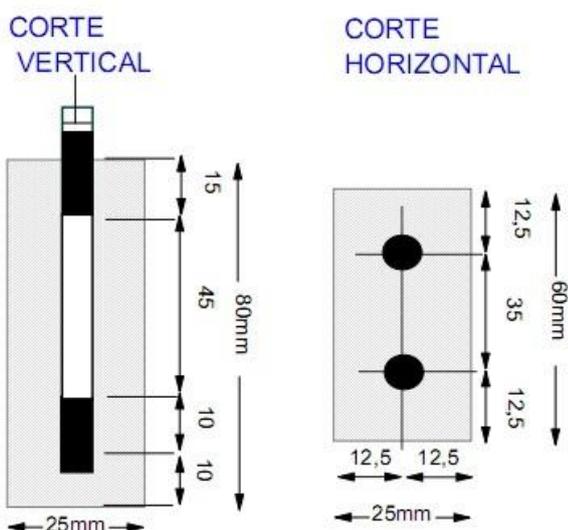


Figura 3.3 - Dimensões do aço tipo CA – 50 utilizado no experimento

3.5 Água

A água utilizada na composição das amostras de concreto e argamassa foi proveniente da rede de abastecimento pública do Estado de Pernambuco (COMPESA).

3.6 Tipos e quantidades de corpos-de-prova

Nesta pesquisa, os ensaios através das medidas eletroquímicas e de aspersão de nitrato de prata foram utilizados corpos-de-prova de diferentes formas geométricas, conforme Figura 3.4.

A metodologia utilizada no cálculo dos traços dos corpos-de-prova de concreto e de argamassa usados no programa experimental seguiu as recomendações do ACI adaptado por ALVES (1993). Esta metodologia foi utilizada por ser de simples compreensão e adaptação.

Antes de se proceder à moldagem dos concretos e das argamassas foi realizada a secagem do agregado miúdo ao ar de modo que não houvesse interferência da umidade nos traços especificados.

Os corpos-de-prova que foram utilizados apresentaram as seguintes medidas:

- Corpos-de-prova de 10 cm x 20 cm (cilíndrico), utilizados na moldagem no traço de concreto, depois de desmoldados foram colocados na câmara úmida até o dia do ensaio de esclerometria e de resistência à compressão, conforme Figura 3.5(a).
- Corpos-de-prova de 5 cm x 10 cm (cilíndrico), utilizados na moldagem no traço de argamassa com a finalidade de avaliação dos cloretos livres, depois de desmoldados foram colocados na câmara úmida até 3 dias e depois colocado no espaço livre do laboratório, sendo requisitados nos períodos estabelecidos para cada tipo de avaliação, conforme Figura 3.5(b).
- Corpos-de-prova de 8 cm x 6 cm x 2,5 cm (prismático), utilizados na moldagem no traço de argamassa com a finalidade de realizar as medidas eletroquímicas, depois de desmoldados foram colocados na câmara úmida, no período de 3 dias, posteriormente a este período foram colocados no espaço do laboratório, sendo utilizados

diariamente para as devidas aferições, utilizando o instrumento, conforme Figura 3.5(c)



Figura 3.4 - moldes utilizados no preparo dos CP's

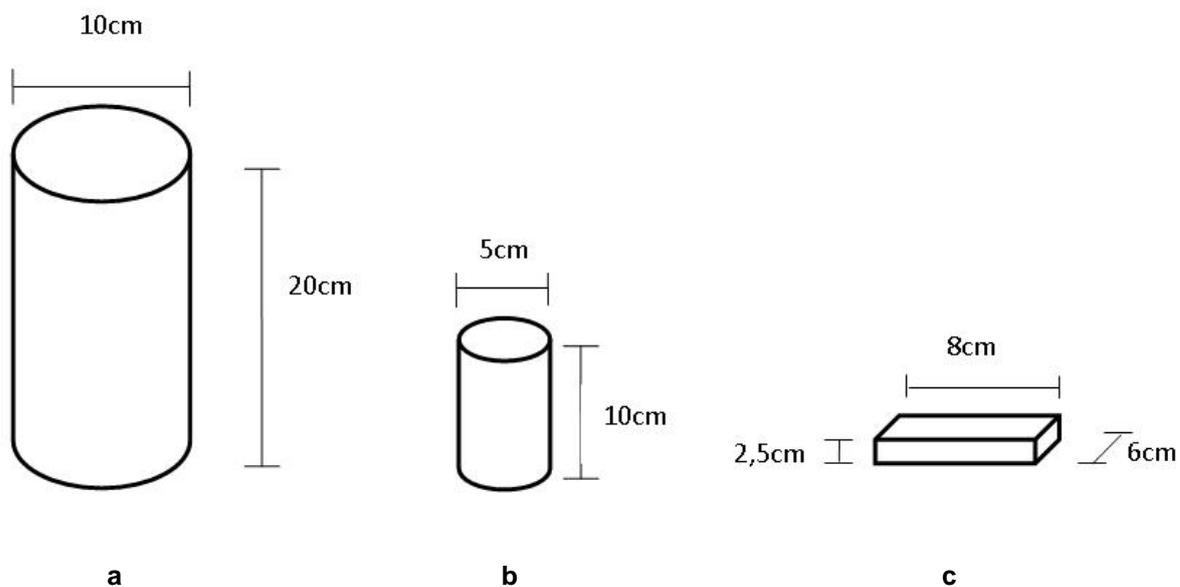


Figura 3.5 - Dimensões do corpo-de-prova: (a) usado na resistência à compressão, (b) usado na avaliação de cloretos livres e (c) usado para as medidas eletroquímicas

Para a avaliação dos cloretos livres foram moldados corpos-de-prova cilíndricos de argamassa de 5 cm x 10 cm. Estes corpos-de-prova de argamassa serviram de simulação de cobrimento das armaduras para o concreto.

Os ensaios de resistência à compressão do concreto serviram como parâmetros auxiliares, uma vez que ainda hoje, são requisitos muito importantes de

caracterização.

Tais corpos-de-prova permaneceram em câmara úmida até a data dos ensaios, pelo tempo de 28 dias.

Faz-se necessário lembrar que o Ferro CA 50, utilizados nos corpos-de-prova prismáticos não recebeu nenhum tipo de tratamento antes de seu uso, tendo em vista a simulação do não tratamento do ferro no canteiro de obra das empresas de construções brasileiras.

O número de corpos-de-prova utilizados em cada ensaio, assim como o total de corpos-de-prova desta pesquisa, pode ser observado na Tabela 3.7 abaixo:

Tabela 3.7 - Quantidade geral de corpos-de-prova por tipo de ensaio

Tipo de ensaio	Dimensão CP (cm)	Idades do ensaio (dias)	Tipo de cimento									Total	
			CP II F 32			CP IV			CP V				
			Teor de cloretos										
			0%	0,4%	2,0%	0%	0,4%	2,0%	0%	0,4%	2,0%		
Profundidade de carbonatação	5 x 10 (cilíndrico)	28	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	36
Aspersão de nitrato de prata	5 x 10 (cilíndrico)	7, 14, 21, 28	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	144
Resistência à compressão e esclerometria	10 x 20 (cilíndrico)	28	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	36
Potencial de corrosão	8 x 6 x 2,5 (prismático)	diária	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	36

3.6.1. Concreto

Para o traço do concreto foram fixadas algumas propriedades julgadas necessárias nos canteiros de obras brasileiros:

- Abatimento do tronco de cone: 70 ± 10 mm;
- Relação água/cimento: 0,60.

Com os cálculos todos delineados, obteve-se o traço unitário a seguir: 1: 2,44 : 3,01 : 0,6 (cimento: areia : brita : água).

As porcentagens de cloretos são de: 0%; 0,4% e 2,0%, foram tomadas com base do peso do cimento e foram determinados após o cálculo do teor de cimento usado na mistura.

O teor de material usado em cada traço de concreto é mostrado na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 - Quantidade de material usado em cada traço de concreto por tipo de cimento

TEOR DE CLORETOS (%)	CIMENTO kg	AREIA kg	BRITA kg	ÁGUA ml	CLORETOS g
0	3.50	8.54	10.54	2.10	0,00
0,4	3.50	8.54	10.54	2.10	14,00
2,0	3.50	8.54	10.54	2.10	70,00

Na execução dos traços de concreto houve uma grande preocupação em se respeitar rigorosamente as quantidades de material especificadas no traço e o tempo de agitação no misturador mecânico. Sabe-se, porém, que as propriedades do concreto no estado fresco variam de cimento para cimento.

Cimento, areia e brita são pesados em balança digital com precisão de 0,01 kg. Já o NaCl, por ter pouca massa em relação aos materiais, foi pesado em balança digital com precisão de 0,01 g.

A seleção e secagem, o material foi devidamente pesado e acondicionado em recipientes para a execução do concreto em misturador mecânico de eixo inclinado (betoneira). A ordem de colocação do material no misturador mecânico foi a seguinte:

- 35% da água + 100% da brita + 65% da areia. Sequencialmente, liga-se o misturador mecânico para que ocorra a mistura destes materiais por cerca de um minuto e meio;
- 100% do cimento + 65% da água. Agita-se o misturador por mais 1 minuto e adiciona-se o restante da areia (35%). Continuando a Agitação por mais 7 minutos.

Após este procedimento foi realizado o ensaio de abatimento de tronco de cone (ver Figura 3.6) e de massa específica do concreto segundo a NBR NM 67:

(1998).



Figura 3.6 - ensaio de abatimento (Slump Test)

Os corpos-de-prova cilíndricos de 10 cm x 20 cm foram moldados em duas camadas, conforme a NBR 7215, (1997) e vibrados seguindo as recomendações da NBR 5738, (2008).

3.6.2. Argamassa

Os corpos-de-prova de argamassa foram empregados no programa experimental e também utilizados para simular o cobrimento do concreto. Os traços utilizados na série de corpos-de-prova de argamassa tiveram as mesmas características do concreto, porém, sem o agregado graúdo.

Com esta retirada, o traço unitário da argamassa ficou assim estabelecido: 1 : 2,44 : 0,6 (cimento : areia : água).

Na Tabela 3.9 abaixo, podem-se observar os teores dos respectivos materiais utilizados em cada traço de argamassa.

Tabela 3.9 - Quantidade de material usado em cada traço de concreto por tipo de cimento

TEOR DE CLORETOS (%)	CIMENTO kg	AREIA Kg	AGUA ml	CLORETOS g
----------------------	------------	----------	---------	------------

0	1.50	3.66	0.90	0,00
0,4	1.50	3.66	0.90	6.00
2,0	1.50	3.66	0.90	30.00

Cimento e areia foram pesados em balança digital com precisão de 0.1 g. O NaCl, por razões já explicadas no item 3.6.1, foi pesado em balança digital com precisão de 0,01 g.

Após seleção e secagem, os materiais foram devidamente pesados e a mistura dos materiais corresponde a esta sequência: água, cimento e areia foram despejados em bandeja metálica com uma ordem já estabelecida em norma. Nas misturas onde havia cloretos, estes foram energicamente misturados à água de amassamento por 2 minutos.

Cimento, areia, água e NaCl foram energicamente misturados por cerca de 7 minutos, então procedeu-se à colocação da argamassa nos moldes cilíndricos metálicos de 5 cm de diâmetro por 10 cm de altura, em 4 camadas de 25 golpes com soquete padrão, posteriormente colocado na câmara úmida para depois ser desmoldado.

Também foram moldados os cilíndricos de 5 cm x 10 cm, que depois de desmoldados foram colocados no espaço do laboratório no período de 28 dias para realizar as medidas de profundidade de carbonatação com aplicação da solução de fenolftalaina, com os diversos tipos de cimentos.

3.7 Ensaios complementares

3.7.1 Caracterização físico-química dos cimentos

A caracterização físico-química dos cimentos Portland utilizados como aglomerante nesta pesquisa revelou-se bastante útil, principalmente na discussão sobre a capacidade de fixação dos cloretos.

3.7.1.1 Cimento Portland (CP II-F-32)

O cimento Portland composto com filler contém em sua composição entre 90% a 94% de clínquer + sulfato de cálcio e 6% a 10% de material carbonático, em massa, de acordo com a NBR 11578: (1997).

É o cimento para uso em geral nas diversas construções, porém deve ser utilizado onde não se exijam grandes propriedades especiais para o cimento.

As características físico-químicas do cimento Portland composto com filler são apresentadas e discutidas nas Tabelas 3.5 e 3.6.

3.7.1.2 Cimento Portland pozolânico (CP IV-32)

O cimento Portland pozolânico deve possuir entre 15% a 50% de material pozolânico e de 0% a 5% de material carbonático em massa em sua composição, como prescreve a NBR 5736:(1999).

São considerados materiais pozolânicos, pela ABNT, os materiais silicosos e silicoaluminosos que por si só possuem pouca ou nenhuma atividade, mas que, quando finalmente moídos e em presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente, formando compostos com propriedades cimentíceas.

Os materiais pozolânicos classificam-se em:

- Pozolanas naturais: materiais de origem vulcânica, geralmente ácidos, ou de origem sedimentar;
- Pozolanas artificiais: materiais provenientes de tratamento térmico por subprodutos industriais com atividade pozolânica, tais como argilas calcinadas, cinzas volantes, escórias siderúrgicas ácidas, sílica ativa, rejeitos silicoaluminosos de craqueamento de petróleo, cinzas de resíduos vegetais e rejeitos de carvão mineral.

Este cimento é indicado para concretagem muito volumosas, como na

construção de barragens, por produzir baixa quantidade de calor. Também é usado quando há perigo de ocorrer trincas no concreto devido à dilatação que acompanha a hidratação e posterior contração, bem como devido a variações de temperatura durante a pega. É utilizado em obras comuns, marítimas e barragens.

As características físico-químicas do cimento Portland pozolânico empregado na pesquisa são apresentadas e discutidas nas Tabelas 3.5 e 3.6.

3.7.1.3 Cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI)

O Cimento Portland de alta resistência inicial deve possuir até 5% de material carbonático em massa em sua composição, de acordo com NBR 5733:(1991).

O cimento de alta resistência inicial é especialmente indicado para indústrias de pré-moldados ou estruturas que necessitem de deformação rápida, elevada resistência nas primeiras horas e maior durabilidade em ambientes agressivos.

As características físico-químicas do cimento Portland de alta resistência inicial empregado na pesquisa são apresentadas e discutidas nas Tabelas 3.5 e 3.6.

3.7.2 Resistência à compressão

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados de acordo com a NBR 5739:2007. Para tanto, foram confeccionados, segundo os procedimentos de moldagem descritos na NBR, 4 corpos-de-prova de dimensões 10 cm x 20 cm (Figura 3.7), variando o tipo de cimento utilizado e o teor de cloretos adicionado a mistura. Após um período de cura ao ar de 3 dias, os CP's foram desmoldados e acondicionados em tanque submerso até completarem a idade de 28 dias.



Figura 3.7 - Corpos-de-prova utilizados no ensaio de resistência à compressão

A prensa utilizada para a realização dos ensaios foi a Máquina Universal de Ensaio, computadorizada, com capacidade máxima de 100 toneladas, disponível no Laboratório de Materiais de construção da Universidade Católica de Pernambuco, conforme Figura. 3.8. Os resultados e discussões relativas a estes ensaios são apresentados no Item 4.1.1.



Figura 3.8 - Máquina universal de ensaios

3.7.3 Dureza superficial através do esclerômetro de reflexão

Paralelamente aos ensaios de resistência à compressão os Cp's foram

submetidos, antes do ensaio de ruptura, à avaliação da dureza superficial através do esclerômetro de reflexão do tipo SCHMIDT, conforme podemos observar na Figura 3.9.



Figura 3.9 - Esclerômetro de reflexão

O esclerômetro de reflexão do tipo Schmidt é o instrumento utilizado para a avaliação da dureza superficial do concreto com base no princípio do Ricochete. No Brasil, o procedimento para execução desse ensaio é estabelecido na NBR 7584(1995).

O esclerômetro é um equipamento leve, simples de operar e barato. Com esse instrumento é possível avaliar a uniformidade da resistência mecânica do concreto "in loco".

Segundo Mehta;Monteiro:(2008), “os valores obtidos não são precisos já que depende da uniformidade da superfície, da condição de umidade, da carbonatação superficial e da rigidez do elemento estrutural mesmo se corrigindo a localização do êmbolo”.

Os resultados obtidos são apresentados no Capítulo 4, demonstrando os resultados de dureza superficial previsto através do ensaio de esclerometria., com cada tipo de cimento e com as diversas adição de cloretos.

3.7.4 Profundidade de Carbonatação

Também se julgou necessária a realização do ensaio de profundidade de carbonatação com fenolftaleína nos corpos-de-prova cilíndricos de argamassa de 5 cm x 10 cm (Figura 3.10), a partir dos 28 dias.

Os ensaios para a determinação da profundidade de carbonatação foram realizados de acordo com as recomendações da CPC-18 da RILEM (1988), lembrando que as profundidades de carbonatação registradas dizem respeito à ação natural do CO₂ sobre os corpos-de-prova.



(a)

(b)

(c)

Figura 3.10 - Sequência da determinação da profundidade de carbonatação

Para análise criteriosa do desempenho dos cimentos Portland empregados, foram tomadas medidas periódicas de 7, 14 e 28 dias nos corpos-de-prova.

Para acompanhar o processo de corrosão, várias leituras foram feitas ao longo do período de tempo desejado, conforme orientação de (Helene, (1993).

3.7.5 Ensaio de aspersão de solução de nitrato de prata

Para procedimento da aplicação do método de aspersão da solução de nitrato de prata foram utilizados os seguintes materiais básicos descritos a seguir:

- Solução de Nitrato de prata;
- Balança de 0,01g de precisão;
- Água;
- Balão volumétrico;

- Espátula;
- Bastão de vidro;
- Frasco aspersor;
- Luvas impermeáveis de borracha;
- Paquímetro.

Com estes materiais é preparada uma solução 0,1 M de nitrato de prata em água, de acordo com a UNI 7928 (1978). A solução de nitrato de prata foi preparada no laboratório da Universidade Católica de Pernambuco. A solução permaneceu em ambiente com temperatura em torno de 25°C até o instante do ensaio, para que não perdesse seu efeito.

Os corpos-de-prova avaliados com a solução de nitrato de prata tiveram sua superfície quebrada no instante em que for realizado o teste, como também, no ensaio de carbonatação com aplicação da solução fenolftaleína, para facilitar a leitura da profundidade de penetração de cloretos ou mesmo a existência de cloretos.

As idades de ensaio para a série de corpos-de-prova destinados à avaliação de cloretos livres através da aspersão da solução de nitrato de prata foram: 7, 14, 21 e 28 dias. Procurou-se acompanhar, principalmente aos 7 e 28 dias, a proporção de fixação dos cloretos nas diferentes matrizes.

Analisando o estudo realizado por Collepardi: (1997), este nos mostra que “as baixas idades, mesmo com concretos de referência (sem cloretos incorporados à massa) podem apresentar cloretos livres. Estes cloretos seriam provenientes da própria composição do cimento”.

No programa experimental inerente a esta pesquisa foram utilizados corpos-de-prova cilíndricos de argamassa de 5 cm de diâmetro por 10 cm de altura, seccionados ao meio através de martelo e talhadeira. Logo em seguida ao seccionamento da amostra, foi aspergida a solução de nitrato de prata (Figura 3.11) e então os corpos-de-prova foram levados a ambiente iluminado, para que a solução de nitrato de prata pudesse reagir com a presença de cloretos.



Figura 3.11 - Aplicação do nitrato de prata nos corpos-de-prova

Após 15 minutos, identificou-se uma coloração na superfície dos corpos-de-prova (Figura 3.12), que foram registradas para futuras comparações com os ensaios eletroquímicos.

A Tabela 3.10, mostra o critério adotado para avaliação de cloretos livres e combinados com base na norma UNI 7928:(1978).

Tabela 3.10 - Designação dos cloretos em relação à coloração dos corpos-de-prova (adaptada UNI 7928, 1978)

COLORAÇÃO DA SUPERFÍCIE DO CORPO-DE-PROVA	DESIGNAÇÃO
Branca	Presença de cloretos livres
Marrom	Ausência de cloretos livres



Figura 3.12 - Avaliação da presença de cloretos nos corpos-de-prova

Não se deve realizar este ensaio na superfície externa dos corpos-de-prova como também nas estruturas que ficam em contato com as formas, uma vez que estas regiões sofrem o chamado efeito parede, tendo mais água, o que pode ocasionar maior dissolução dos cloretos neste local.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADO

Neste capítulo são apresentados os resultados e as discussões relativas aos ensaios complementares (Item 4.1), desde a caracterização dos cimentos empregados para confecção dos corpos-de-prova, como também pelos ensaios mecânicos de resistência à compressão, dureza superficial através do esclerômetro de reflexão e finalizando com o registro do avanço da frente de carbonatação ao longo do tempo da pesquisa.

Os resultados das avaliações dos parâmetros eletroquímicos são mostrados e analisados no Item 4.2, enquanto os resultados dos ensaios de aspensão da solução de nitrato de prata com indicador de cloretos livres nas amostras são apresentados e analisados no Item 4.3.

Para facilitar a análise, os resultados de cada ensaio são apresentados em relação ao teor de cloretos, por massa de cimento, incorporados à mistura.

4.1 Ensaios de caracterização e complementares ao estudo

Nos Itens 4.1.1 a 4.1.3 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios complementares. Tais ensaios foram realizados de forma a apoiar as discussões dos resultados dos ensaios eletroquímicos (Item 4.2) e principalmente o de aspersão do nitrato de prata (Item 4.3).

4.1.1 Ensaios de resistência à compressão.

Além dos ensaios que serviram de base aos objetivos desta pesquisa (Item 4.2 a 4.3), também foram realizados ensaios de resistência à compressão conforme a NBR 5739, (2007), como ilustrado nas Tabelas 4.1 a 4.3 e na Figura 4.1 abaixo.

Tabela 4.1 Caracterização mecânica do cimento CP II F – 32, moldados com íons-cloreto

Amostra	Teor de cloreto (%)	Carga de ruptura (Kgf)	Tensão de ruptura (MPa)	Média
CP II F 32	0%	17380	22,13	21,83
		16410	20,89	
		17360	22,10	
		17440	22,21	
	0,4%	17470	22,24	20,46
		15170	19,31	
		13810	17,58	
		17840	22,71	
	2%	17570	22,37	22,72
		16880	21,49	
		16900	21,52	
		20030	25,50	

Tabela 4.2 - Caracterização mecânica do cimento CP IV, moldados com íons-cloreto

Amostra	Teor de cloreto (%)	Carga de ruptura (Kgf)	Tensão de ruptura (MPa)	Média
CP IV	0%	15800	20,12	21,03
		16160	20,58	
		17060	21,72	
		17050	21,71	
	0,4%	16760	21,34	20,60
		16030	20,41	
		16390	20,87	
		15540	19,79	
	2%	19030	24,23	23,93
		18920	24,09	
		17200	21,90	
		20030	25,50	

Tabela 4.3 - Caracterização mecânica do cimento CPV – ARI, moldados com íons-cloreto

Amostra	Teor de cloreto (%)	Carga de ruptura (Kgf)	Tensão de ruptura (MPa)	Média
CP V	0%	17710	22,55	22,67
		19620	24,98	
		16970	21,61	
		16930	21,56	
	0,4%	17790	22,65	24,48
		20260	25,80	
		20930	26,65	
		17920	22,82	
	2%	20750	26,42	25,59
		18350	23,36	
		21260	27,07	
		20030	25,50	

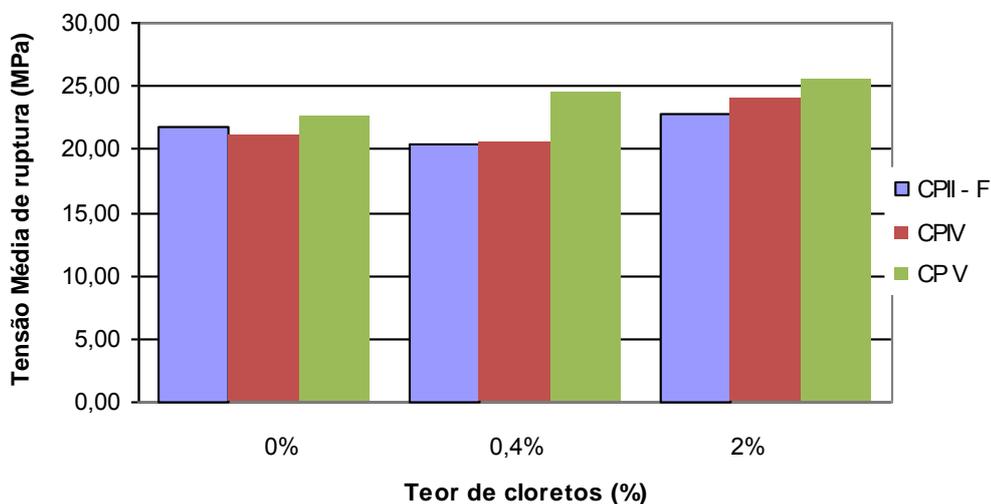


Figura 4.1 - Relação da resistência à compressão (28 dias), moldados com diversos tipos de cimentos e ions-cloreto.

Tais ensaios foram realizados tendo em vista que estas propriedades do concreto endurecido ainda são utilizadas como parâmetro em obras correntes de engenharia.

Tendo em vista que os corpos-de-prova foram confeccionados seguindo o mesmo traço, diferindo apenas o tipo de cimento, da porcentagem de íons-cloreto, se percebe que a composição e finura do cimento são fatores fundamentais para a resistência à compressão.

O grau de hidratação do cimento também é fator determinante da porosidade da pasta endurecida e conseqüentemente da resistência à compressão.

Em relação aos cimentos em estudo com maior área específica (cm^2/g) apresentarão reações de hidratação mais rápidas que os cimentos com menores áreas específicas.

A composição do cimento é importante no sentido de que quanto maior o teor de C_3S e C_2S do cimento, maior será a porcentagem de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), principal responsável pela resistência do concreto.

Os maiores registros de resistência à compressão aos 28 dias foram dos corpos-de-prova confeccionados com o cimento CP V-ARI, seguido pelo CP IV-32, os quais são cimentos que possuem as maiores áreas específicas, nesta ordem. No caso do CP V-ARI, na composição deste cimento, a existência do teor SiO_2 é compensado pela elevada finura dos grãos. O menor valor de resistência à compressão foi registrado no CP II-F-32, que possuem a menor área específica.

4.1.2 Ensaio de esclerometria.

Os resultados do ensaio de esclerometria são apresentados nas Tabelas 4.4 a 4.6 e nas Figuras 4.2 e 4.3 seguintes.

Tabela 4.4 - Resultados da esclerometria para os corpos de prova confeccionados com cimento CII, com adição de cloretos

Teor de cloreto	CP	VALORES DE REFLEXÃO										MEDIA	Tensão ruptura prevista (MPa)	Carga ruptura real (Kgf)	Tensão ruptura real (MPa)
0%	1	25	25	22	27	27	26	26	23	28	25,4	24,0	17380	22,13	
	2	22	22	20	24	20	26	20	22	18	21,6	18,0	16410	20,89	
	3	24	22	22	18	23	24	18	25	25	22,3	19,0	17360	22,10	
	4	24	24	24	23	25	22	25	21	25	23,7	21,0	17440	22,21	
0,4%	1	22	20	24	25	28	29	22	29	26	25,0	23,0	17470	22,24	
	2	25	20	22	24	20	25	23	27	26	23,6	21,0	15170	19,31	
	3	22	22	20	23	20	22	24	25	26	22,7	20,0	13810	17,58	
	4	25	20	24	25	24	20	25	27	20	23,3	21,0	17840	22,71	
2,0%	1	26	24	20	26	26	22	26	20	26	24,0	22,0	17570	22,37	
	2	25	26	24	24	23	26	26	28	26	25,3	24,0	16880	21,49	
	3	26	26	27	24	30	29	30	25	28	27,2	27,0	16900	21,52	
	4	25	23	26	25	26	25	28	27	24	25,4	24,0	20030	25,50	

Tabela 4.5 - Resultados da esclerometria para os corpos de prova confeccionados com o cimento CP IV, com adição de cloreto

Teor de cloreto	CP	VALORES DE REFLEXÃO										MEDIA	Tensão ruptura prevista (MPa)	Carga ruptura (Kgf)	Tensão ruptura (MPa)
0%	1	20	20	20	20	21	18	22	22	18	20,1	15,0	15800	20,12	
	2	18	22	23	21	22	18	24	20	20	20,9	16,0	16160	20,58	
	3	22	20	21	23	24	18	18	20	22	20,9	16,0	17060	21,72	
	4	23	22	22	24	18	20	20	18	21	20,9	16,0	17050	21,71	
0,4%	1	21	18	22	20	18	20	22	21	19	20,1	15,0	16760	21,34	
	2	18	18	19	24	22	18	22	24	24	21,0	16,0	16030	20,41	
	3	20	22	18	23	23	18	22	18	22	20,7	16,0	16390	20,87	
	4	20	18	22	23	22	22	22	24	25	22,0	17,0	15540	19,79	
2,0%	1	20	22	24	25	24	24	22	26	26	23,7	19,0	19030	24,23	
	2	18	24	20	24	22	22	27	22	26	22,8	19,0	18920	24,09	
	3	26	22	20	25	22	23	22	21	20	22,3	17,0	17200	21,90	
	4	22	26	24	24	25	26	22	26	26	24,6	22,0	20030	25,50	

Tabela 4.6 - Resultados da esclerometria para os corpos de prova confeccionados com cimento CP V – ARI, com adição de cloreto

Teor de cloreto	CP	VALORES DE REFLEXÃO										MEDIA	Tensão ruptura prevista (MPa)	Carga ruptura (Kgf)	Tensão ruptura (MPa)
0%	1	24	26	26	30	28	24	31	32	34	28,3	29,0	17710	22,55	
	2	24	32	26	26	29	25	27	25	29	27,0	27,0	19620	24,98	
	3	22	21	26	28	22	24	25	26	27	24,6	23,0	16970	21,61	
	4	22	30	27	27	27	30	23	23	29	26,4	26,0	16930	21,56	
0,4%	1	22	23	25	23	23	28	27	26	23	24,4	23,0	17790	22,65	
	2	28	30	30	24	26	30	24	24	29	27,2	27,0	20260	25,80	
	3	24	30	29	28	30	31	28	29	29	28,7	30,0	20930	26,65	
	4	22	24	28	24	30	27	28	24	26	25,9	25,0	17920	22,82	
2,0%	1	31	31	31	32	29	28	32	29	32	30,6	34,0	20750	26,42	
	2	30	30	26	26	24	22	18	24	24	24,9	23,0	18350	23,36	
	3	28	18	30	26	27	20	22	24	26	24,6	23,0	21260	27,07	
	4	28	26	26	26	29	29	27	24	26	26,8	27,0	20030	25,50	

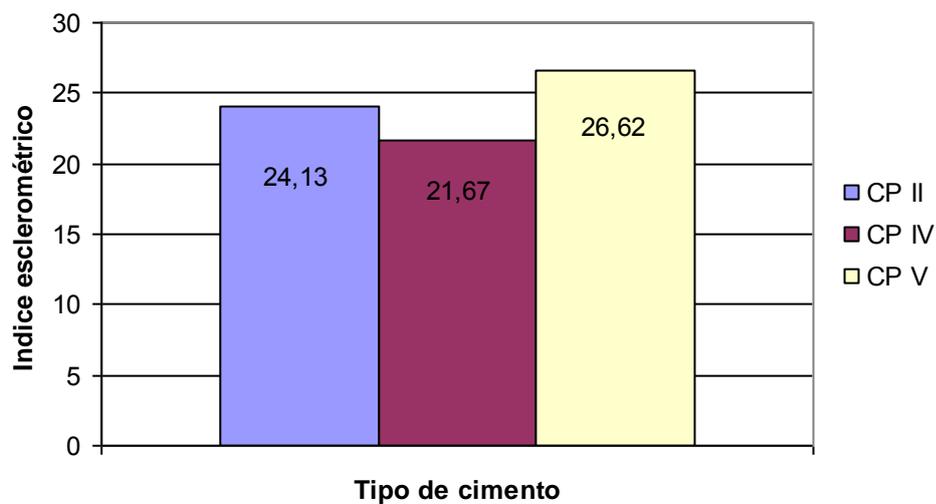


Figura 4.2 - Média dos Índices esclerométricos

Os resultados demonstram que o cimento CP V apresentou uma dureza superficial superior aos demais concretos, seguido pelo cimento CP II e por fim o cimento CP IV.

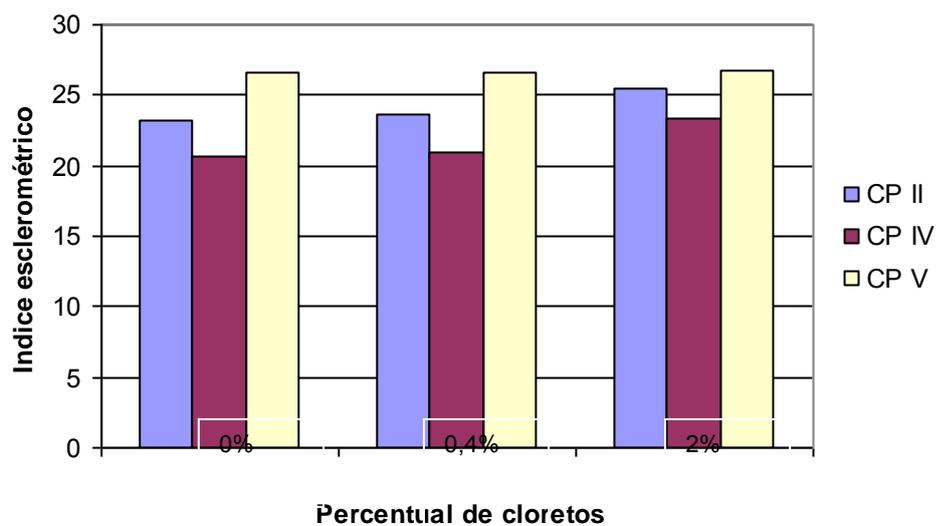


Figura 4.3 - Índice esclerométrico por percentual de cloretos

Com relação aos teores de cloreto, para uma mesma amostra de cimento não houve alterações significativas nos resultados do ensaio esclerométricos, se aproximando de zero nas amostras de cimento CPIV .

4.1.3 Profundidade de carbonatação

Os registros da profundidade de carbonatação auxiliaram nas discussões a respeito da eficiência da técnica de aspersão da solução de nitrato de prata, pois se sabe que por efeito da carbonatação há uma decomposição do Sal de Friedel, liberando os cloretos que se encontravam combinados, além da sobreposição da identificação dos sais de cloreto de prata e carbonato de prata com aplicação do método colorimétrico, alvo do presente estudo.

As medidas de profundidade de carbonatação foram realizadas utilizando-se o corpo-de-prova seccionado em duas faces, medindo as distâncias entre as bordas nas quatro posições mencionadas, conforme mostra a figura abaixo:

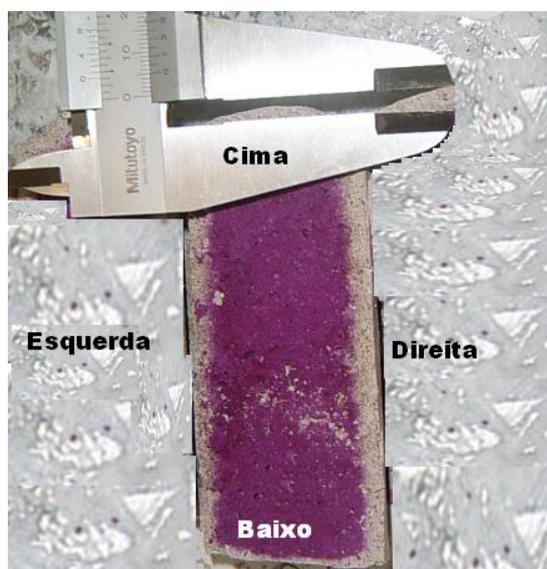


Figura 4.4 - Posição de leitura no CP para medida da profundidade de carbonatação

4.1.3.1 Amostras

a) Amostra de referência, com 0 % de cloretos em relação à massa do cimento

O Quadro 4.1 retrata bem o fato de que o cimento CP IV-32 que contém certas adições, o qual possui menor reserva alcalina, apresenta as maiores

profundidades de carbonatação em relação aos demais cimentos estudados.

O efeito da velocidade de hidratação e o conseqüente fechamento prematuro dos poros demonstraram fatores de grande importância na análise da profundidade de carbonatação

Quadro 4.1 – Profundidade de carbonatação em corpo de prova com 0% de teor de cloreto em argamassa

Tipo de cimento			CP II F 32					CP IV					CP V ARI				
CP			I	II	III	IV	Média	I	II	III	IV	Média	I	II	III	IV	Média
Distâncias das leituras (mm)	cima	face 1	4	4	3	4	3,75	7	6	6	5	6	1	1	1	1	1
		face 2	4	4	3	4	3,75	6	5	7	6	6	1	1	1	1	1
	baixo	face 1	0	0	0	0	0	1	1	2	1	1,25	0	0	0	0	0
		face 2	0	0	0	0	0	1	1	2	1	1,25	0	0	0	0	0
	dir.	face 1	2	1	2	1	1,5	5	6	3	3	4,25	2	1	1	1	1,25
		face 2	3	1	2	2	2	2	2	6	5	3,75	1	1	1	1	1
	esq.	face 1	2	0	1	2	1,25	2	2	6	5	3,75	1	0	1	1	0,75
		face 2	2	1	1	1	1,25	5	6	3	2	4	2	0	1	1	1

Apesar dos pequenos valores medidos, foi possível registrar as diferenças entre as argamassas ensaiadas, conforme se pode observar na Figura 4.2 abaixo.

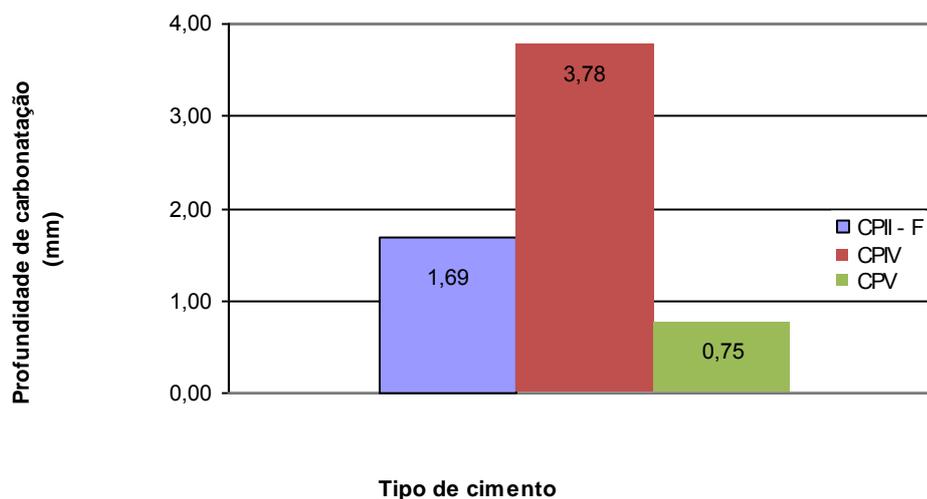


Figura 4.5 - Variação da profundidade de carbonatação nas amostras com 0% de cloreto, em argamassas

b) Amostra contendo 0,4% de cloretos em relação à massa do cimento

Nas amostras com 0,4% de cloreto em relação à massa de cimento, verifica-se que a maior profundidade de carbonatação ocorreu com o CP IV-32, onde a reserva alcalina é menor em relação aos outros tipos de cimentos estudados. A menor profundidade de carbonatação ocorreu no CP V-ARI como está ilustrado abaixo.

Quadro 4.2 - Profundidade de carbonatação em corpos de prova com 0,4% de teor de cloreto em argamassa

Tipo de cimento			CP II F 32					CP IV					CP V ARI				
CP			I	II	III	IV	Média	I	II	III	IV	Média	I	II	III	IV	Média
Distâncias das leituras (mm)	cima	face 1	3	3	3	3	3,00	6	7	5	6	6,00	1	1	1	1	1,00
		face 2	3	3	3	4	3,25	5	7	5	7	6,00	1	1	1	1	1,00
	baixo	face 1	0	0	0	1	0,25	1	1	1	1	1,00	0	0	0	0	0,00
		face 2	0	0	1	0	0,25	1	1	1	1	1,00	0	0	0	0	0,00
	dir.	face 1	1	2	2	2	1,75	5	5	4	5	4,75	1	1	0	1	0,75
		face 2	2	1	2	2	1,75	3	5	5	4	4,25	1	0	1	1	0,75
	esq.	face 1	2	2	1	2	1,75	1	1	2	1	1,25	1	1	1	1	1,00
		face 2	1	1	2	2	1,50	1	2	1	1	1,25	0	1	0	1	0,50

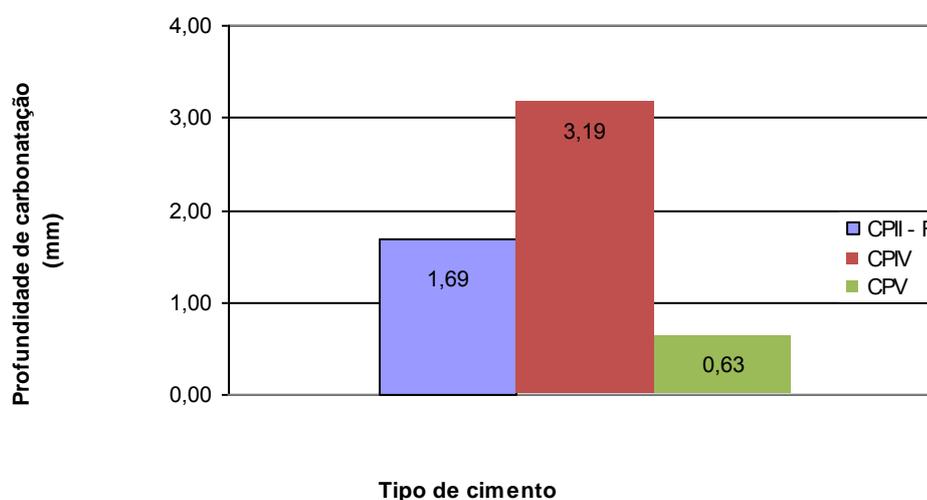


Figura 4.6 - Variação da profundidade de carbonatação nas amostras com 0,4% de cloreto em argamassa

c) Amostras contendo 2,0% de cloretos em relação à massa de cimento

Nas amostras com 2,0% de cloretos em relação à massa de cimento verifica-se que maior profundidade de carbonatação ocorre com o CP IV-32. Já as menores profundidades ocorreram CP V-ARI e CP II-F-32, respectivamente, ilustrado no Quadro 4.3 e na Figura 4.7.

Quadro 4.3 – Profundidade de carbonatação em corpos de prova com 2% teor de cloreto em argamassa

Tipo de cimento			CP II F 32					CP IV					CP V ARI				
CP			I	II	III	IV	Média	I	II	III	IV	Média	I	II	III	IV	Média
Distâncias das leituras (mm)	cima	face 1	2	2	2	3	2,25	4	6	5	4	4,75	1	1	1	1	1,00
		face 2	2	2	2	3	2,25	4	6	4	5	4,75	1	1	1	1	1,00
	baixo	face 1	0	0	0	0	0,00	2	2	2	3	2,25	1	0	0	0	0,25
		face 2	0	0	0	0	0,00	2	3	2	2	2,25	1	0	0	0	0,25
	dir.	face 1	1	2	2	2	1,75	3	3	4	3	3,25	1	0	0	1	0,50
		face 2	2	2	2	2	2,00	3	4	4	4	3,75	1	1	1	1	1,00
	esq.	face 1	2	1	2	2	1,75	3	3	4	3	3,25	1	0	0	1	0,50
		face 2	1	2	1	2	1,50	3	4	3	3	3,25	1	1	0	1	0,75

Com base nos dados das amostras confeccionadas, o CP IV-32 apresentou a maior profundidade de carbonatação

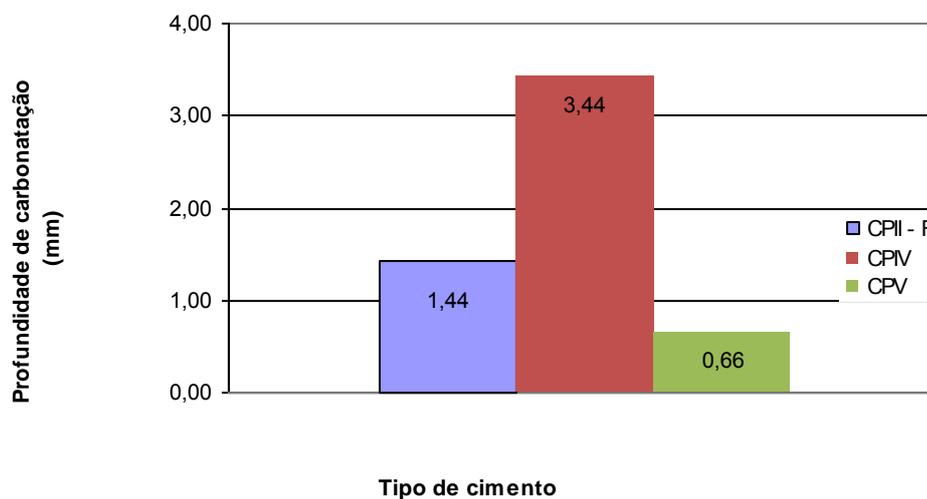


Figura 4.7 - Variação da profundidade de carbonatação nas amostras com 2,0% de teor cloreto em argamassa

4.2 Medidas eletroquímicas

Nesta etapa, são apresentados os resultados das medidas eletroquímicas, nos corpos-de-prova prismáticos armados (Figura 4.8), com base no eletrodo para leitura do potencial de corrosão (Figura 4.9) e através destas medidas se pode avaliar a evolução do potencial de corrosão em função do tempo.



Figura 4.8 - Corpos-de-prova prismáticos utilizados nas leituras eletroquímicas

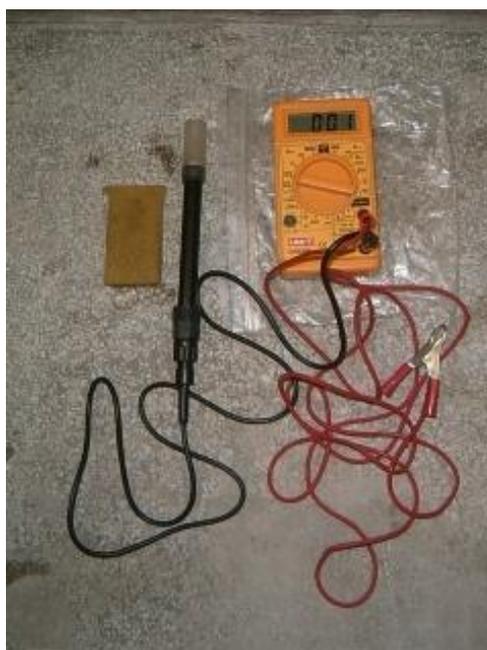


Figura 4.9 - Eletrodo para leitura do potencial de corrosão

4.2.1 Potencial de Corrosão

A avaliação do potencial de corrosão permite conhecer qualitativamente a possibilidade da ocorrência da corrosão nos corpos-de-prova confeccionados com os cimentos estudados, conforme o critério anotado na Tabela 4.7 abaixo:

Tabela 4.7 - Critério para avaliação do potencial de corrosão (ASTM C 876- 09)

Potencial de corrosão relativo ao eletrodo de referência de cobre/sulfato de cobre (mV)	Probabilidade de corrosão %
Mais negativo que – 350 mV	95 %
Mais positivo que – 200 mV	5%
Entre - 200 mV e – 350 mV	Incerta

4.2.1.1 Concreto de referência (concreto com 0% de cloretos em relação à massa do cimento)

Todos os concretos de referência, utilizando os cimentos já citados registraram, no início das medidas, entre o 3º e o 28º dia, medidas de potencial variando entre -350 mV e -200 mV, o que caracteriza a corrosão superficial do aço devido à formação da película passivante. Entretanto, após este período, todos os corpos-de-prova de referência indicaram probabilidade de ocorrência de corrosão de 5%, apresentado as medidas de potencial maiores de -200 mV, podendo-se dizer que nenhuma armadura corroeu-se ativamente durante o tempo de duração dos ensaios, conforme mostra as Figuras 4.10. a 4.12.

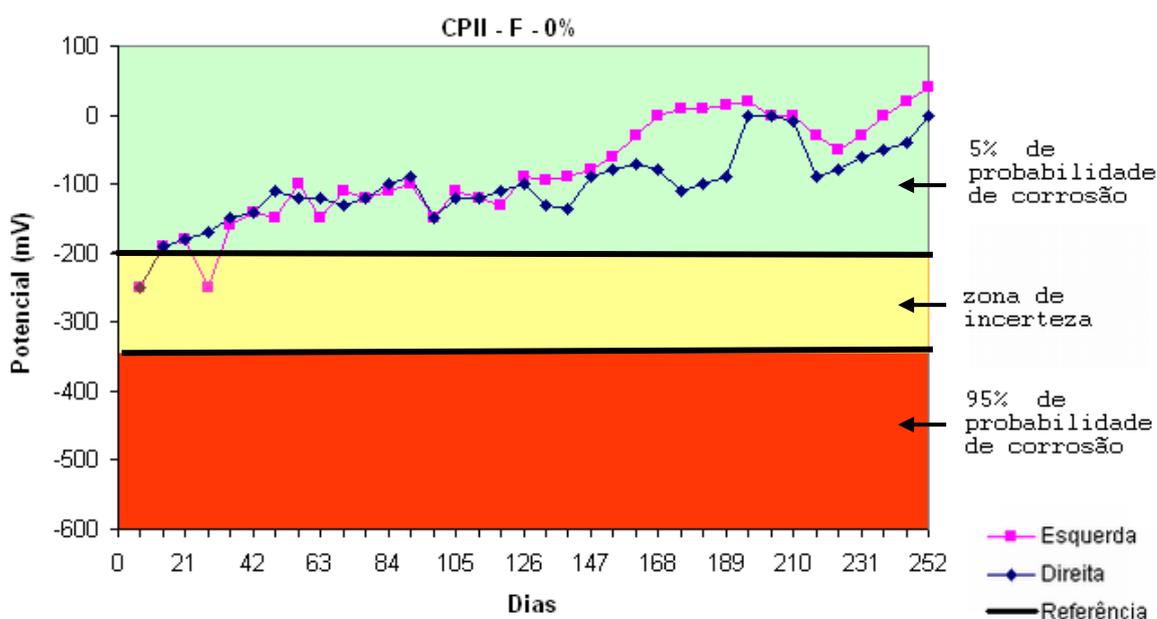


Figura 4.10 - Potencial de corrosão em corpos-de-prova com cimento CP II – F (0% de íons-cloreto)

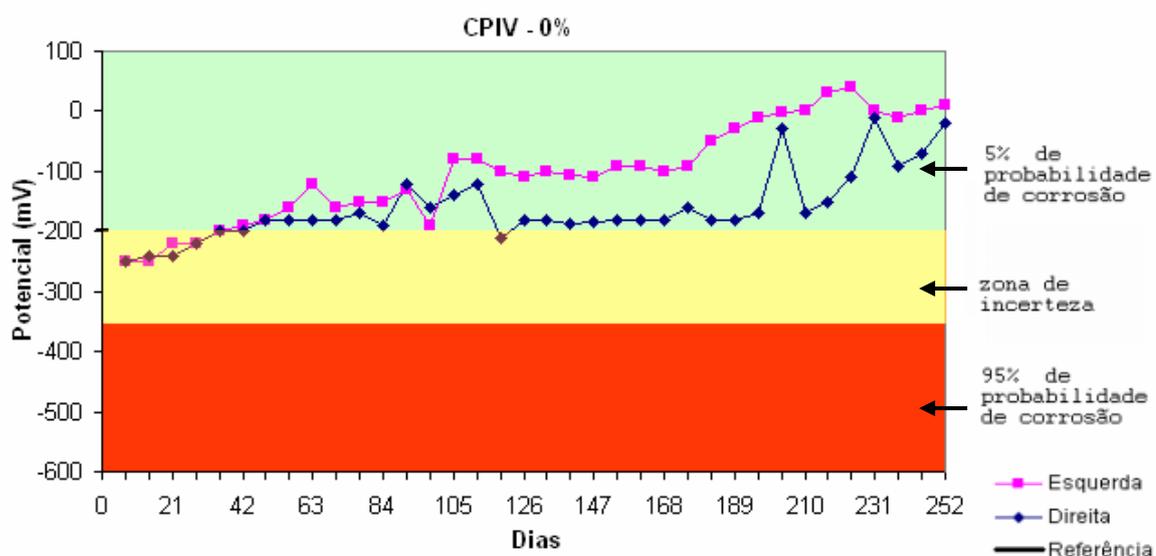


Figura 4.11 - Potencial de corrosão em corpos-de-prova com cimento CP IV (0% de íons-cloreto)

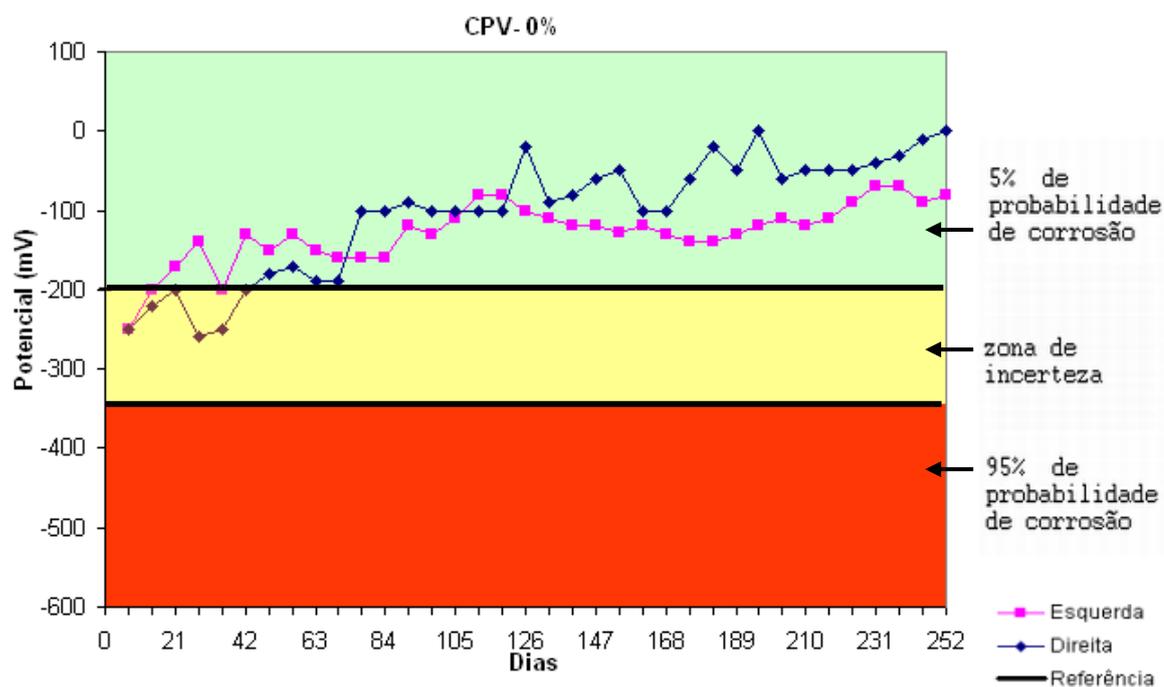


Figura 4.12 - Potencial de corrosão em corpos-de-prova com cimento CP V (0% de íons-cloreto)

4.2.1.2 Concretos com 0,4% de cloretos em relação à massa de cimento

As amostras de CP II-F- 32, CP IV- 32 e o CP V – ARI permaneceram, na maior parte do período de ensaio, na zona de incerteza, com as medida entre - 350 mV e – 200 mV, ilustrado nas Figuras 4.13 a 4.15.

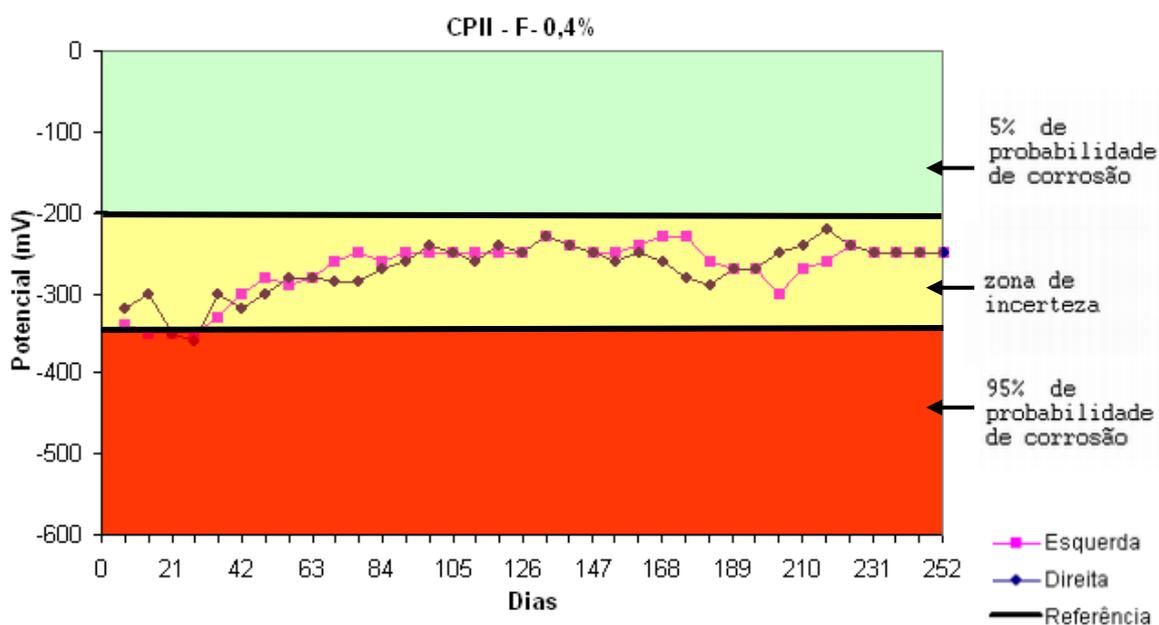


Figura 4.13 - Potencial de corrosão em corpos-de-prova com cimento CP II -F (0,4% íons cloreto)

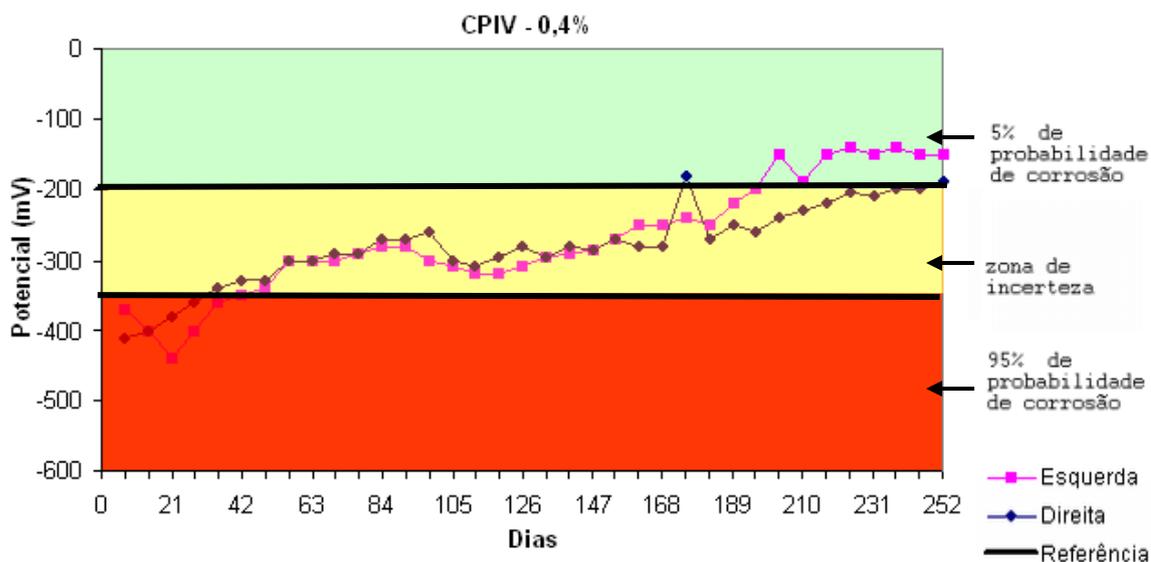


Figura 4.14 - Potencial de corrosão em corpos-de-prova com cimento CP IV (0,4% íons cloreto)

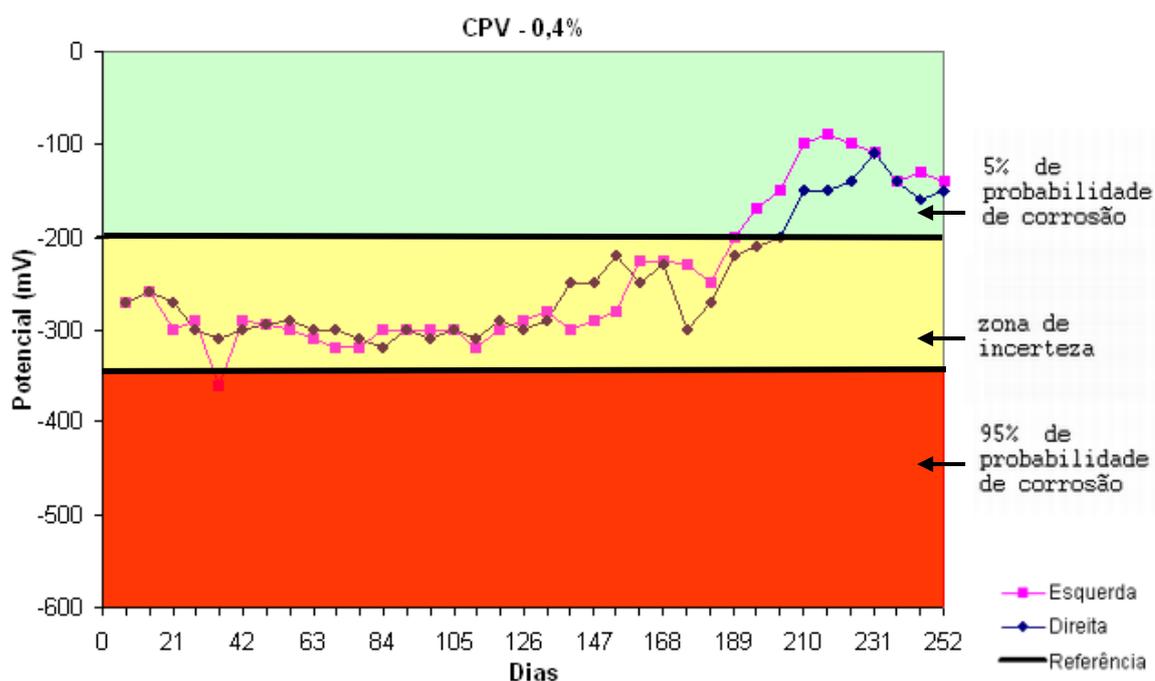


Figura 4.15 - Potencial de corrosão em corpos-de-prova com cimento CP V (0,4% íons cloreto)

4.2.1.3 Concretos com 2% de cloretos em relação à massa de cimento

As amostras de CP II - F - 32, CP- IV e CP-V- ARI permaneceram na maior parte do período de ensaio, na zona de ocorrência de corrosão, com uma taxa de 95%, com a medida abaixo de -350 mV, conforme ilustrado nas figuras 4.16 a 4.18.

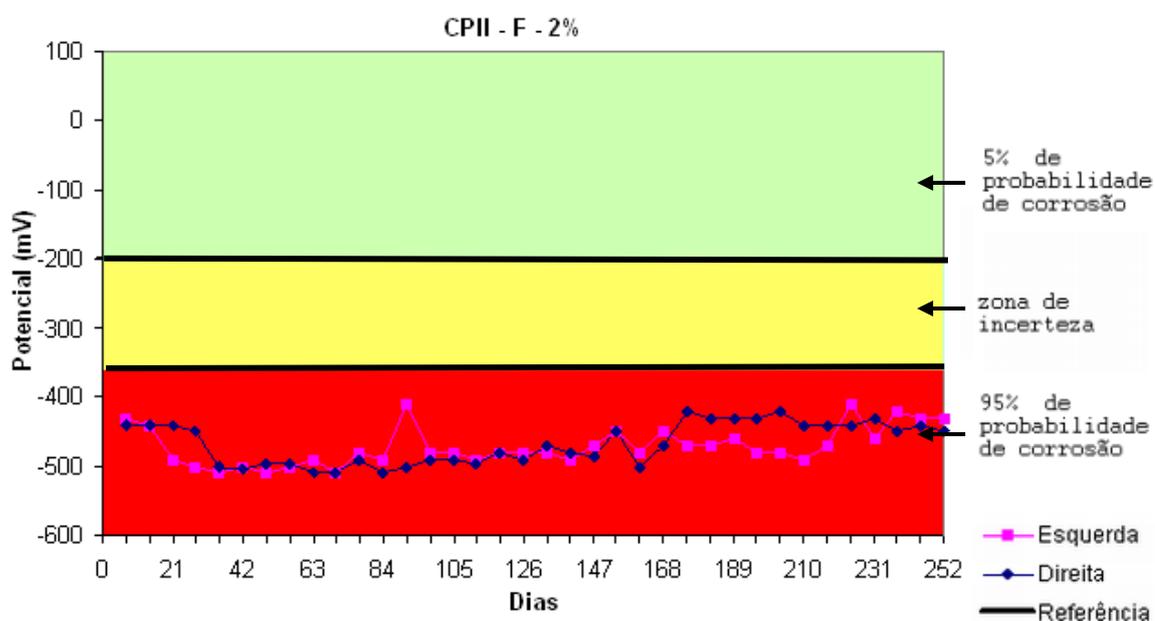


Figura 4.16 - Potencial de corrosão em corpos-de-prova com cimento CP II (2% íons cloreto)

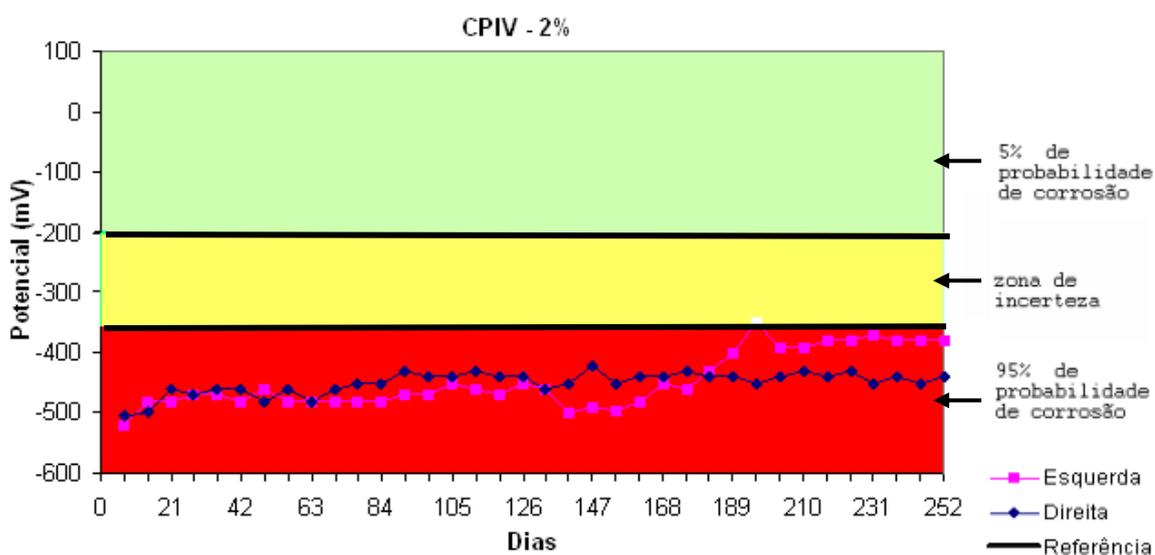


Figura 4.17 - Potencial de corrosão em corpos-de-prova com cimento CP IV (2% íons cloreto)

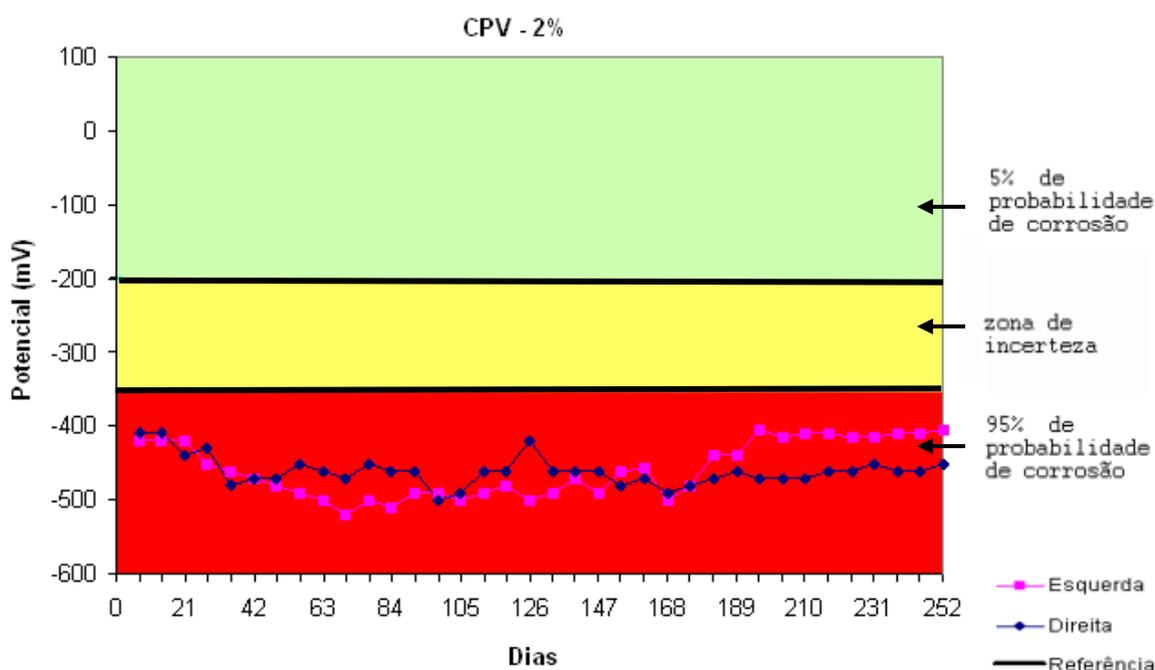


Figura 4.18 - Potencial de corrosão em corpos-de-prova com cimento CP V (2% íons cloreto).

4.3 Ensaios com Aspersão de nitrato de prata

Como já foi mencionado, o método de aspersão da solução de nitrato de prata é meramente qualitativo. A seguir estão dispostas figuras referentes à coloração das superfícies fraturadas, levando-se em consideração que os resultados apresentados em tais figuras são provenientes de análise visual.

Frise-se ainda que os ensaios de aspersão de nitrato de prata foram realizados em dias específicos 7, 14, 21 e 28, para que pudesse observar seus resultados, comparando com as medidas eletroquímicas e profundidade de carbonatação.

Os corpos-de-prova cilíndricos de 5 cm x 10 cm foram seccionados ao meio e então foi efetuada uma inspeção visual após 15 minutos da aspersão da solução de nitrato de prata para identificar a porcentagem de área que indicava cloretos livres ou combinados em cada corpo-de-prova.

A partir dos 28 dias, todos os corpos-de-prova de argamassa também foram

submetidos a ensaios de verificação da profundidade de carbonatação, pois, segundo Collepardi (1997), “o fenômeno da carbonatação é um fator que influencia a eficiência do método colorimétrico de aspersão de nitrato de prata”.

4.3.1 Argamassas de referência (argamassas contendo 0 % de cloretos em relação à massa do cimento).

Os corpos-de-prova de referência apresentaram todos os cloretos combinados até os 28 dias.

Observa-se que, após 28 dias, todas as amostras apresentaram área branca, conforme mostra a Figura 4.19. Este resultado não era o esperado, uma vez que, de acordo com os critérios do método de aspersão de nitrato de prata, as ocorrências de área branca são indicativas de cloretos livres nos poros das amostras. Tal fato ocorreu devido à carbonatação natural das amostras, no laboratório.



Figura 4.19 - Cloretos livres nas amostras contendo 0 % de cloretos em relação à massa do cimento

4.3.2 Argamassas contendo 0,4% de cloretos em relação à massa de cimento

Nas amostras contendo 0,4% de cloretos em relação à massa de cimento, percebe-se que os cloretos levam tempo para ser combinados. Este tempo de fixação dos cloretos pelo C_3A e C_4AF depende do tipo de cimento.

Notou-se que apenas o CP IV-32 e o CP V-ARI alcançaram 0% de área branca. A outra amostra do CP II - F indica baixa percentagem de área branca antes dos 28 dias.



Figura 4.20 - Cloretos livres nas amostras contendo 0,4% de cloretos em relação à massa de cimento

4.3.3 Argamassas contendo 2,0% de cloretos em relação à massa de cimento

Nas amostras contendo 2% de cloretos em relação à massa de cimento, percebe-se que o teor é tão alto que não consegue ser totalmente fixado por qualquer dos tipos de cimento utilizados no programa experimental.



Figura 4.21 - Cloretos livres nas amostras contendo 2% de cloretos em relação à massa de cimento

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 Conclusões

Como este estudo tem como temática principal a verificação da aplicabilidade do método de aspersão de solução de nitrato de prata, deve-se deixar claro que as considerações finais desta dissertação foram feitas levando em conta as duas etapas cronológicas das avaliações, a seguir citadas:

1ª etapa: até 28 dias;

2ª etapa: após 28 dias.

A análise em duas etapas se faz necessária para maior esclarecimento desse processo.

Na 1ª etapa avaliou-se a potencialidade dos cimentos em combinar os cloretos incorporados à mistura. Por outro lado, na 2ª etapa avaliou-se o efeito da carbonatação na reação de desestabilização do Sal de Friedel e na própria avaliação visual do método de aspersão de nitrato de prata.

As medidas de profundidade de carbonatação foram realizadas a partir dos 28 dias da moldagem em pontos diferentes da amostra, constando apenas as médias destas profundidades.

5.1.1 Primeira Etapa

5.1.1.1 Amostras de referência contendo 0% íons cloreto

Nos ensaios de aspersão de solução de nitrato de prata, as amostras não apresentaram ocorrências de área branca. Nota-se que as amostras de referência não foram incorporados cloretos.

5.1.1.2 Amostras contendo 0,4% íons cloreto incorporados à massa

A análise do potencial de corrosão indicou que praticamente todas as amostras se encontravam em zona de “incerteza”, entre -200 mV e -350 mV.

Nos ensaios de aspensão de solução de nitrato de prata, as amostras do cimento CP IV-32 indicaram a combinação total de cloretos aos 28 dias (100%), seguindo-se das amostras de CP II - F, nas quais se verificou 5% de área branca até os 28 dias.

5.1.1.3 Amostras contendo 2,0% de cloretos incorporados à massa

O potencial de corrosão indicou que todas as amostras, sem exceção, se encontravam com 95% de probabilidade de ocorrência de corrosão.

Os ensaios com a solução de nitrato de prata indicaram que o nível de cloretos com 2,0% em relação à massa de cimento é muito alto para ser combinado quimicamente pelos cimentos usados no programa experimental. O tipo de cimento que apresentou menor percentagem de cloretos livres foi o CP V-ARI, com 85% de área branca.

5.1.2 Segunda Etapa

5.1.2.1 Amostras de referência

Nos ensaios realizados com fenolftaleína, o cimento CP V-ARI apresentou as menores profundidades de carbonatação (0,75 mm), seguido pelo cimento CP II-F-32 (1,69 mm). A maior profundidade de carbonatação das amostras de referência foi verificada no cimento CP IV-32 (3,79 mm).

No ensaio com aspensão de solução de nitrato de prata pôde-se observar a ocorrência de área branca devido à formação do C_2CO_3 nos poros da amostra, sendo que a maior percentagem, de 20% de área branca foi notada no cimento CP II - F 32.

5.1.2.2 Amostras contendo 0,4% de cloretos incorporados à massa

As amostras dos cimentos CP II -F e CP IV -32 em relação ao potencial de corrosão permaneceram na faixa de incerteza, porém o cimento CP V – ARI ao final dos ensaios tendeu à faixa de 5% de probabilidade de corrosão.

Nos ensaios de carbonatação nas argamassas com os cimentos referenciados, o cimento CPV-ARI apresentou a menor profundidade de carbonatação (0,625 mm). As maiores profundidades de carbonatação foram verificadas nos cimentos CP IV -32 (3,19 mm) e CP II - F-32 (1,69 mm).

Os ensaios de aspersão de nitrato de prata indicaram um bom desempenho dos cimentos CP II-F-32 e do CP V-ARI, que apresentaram, respectivamente, um teor máximo de 20% e 25% de área branca.

5.1.2.3 Amostras contendo 2,0% de cloretos incorporados à massa

Nos ensaios em relação ao potencial de corrosão, todas as amostras que continham 2,0% de cloretos incorporados encontravam-se na faixa de 95% de probabilidade de corrosão.

A maior profundidade de carbonatação foi observada no cimento CP IV (3,43 mm), seguido pelo cimento CP II-32 (1,69 mm) e o cimento CP V-ARI (0,66 mm).

Notou-se que à medida que o teor de cloretos incorporados à água de amassamento aumentou, a profundidade de carbonatação diminuiu, independentemente do tipo de cimento; isto se deve à higroscopicidade do NaCl, que dificultou a entrada do CO₂.

5.1.3 Aplicabilidade do método de aspersão de nitrato de prata

O método de aspersão de nitrato de prata mostrou-se plenamente aplicável para avaliação da presença de cloretos nas amostras empregadas nesta pesquisa.

A coloração branca apresentada pelo método indica sem sombra de dúvida a presença de sais de cloretos, carbonatos ou sulfatos, dentre outros possíveis sais agressivos à armadura ou ao concreto.

Nas amostras mais antigas, a avaliação da existência de cloretos livres deve estar sempre atrelada à avaliação da profundidade de carbonatação.

No caso de estruturas atacadas simultaneamente pela água do mar e pelo CO₂, a análise com o método de aspersão de nitrato de prata torna-se complicada porque ambos os ataques, de cloretos e de CO₂, geram precipitados, que, em presença de nitrato de prata, são bastante semelhantes. Deve-se neste caso, portanto, proceder ao envio de amostras para laboratório, de maneira a construir o perfil dos cloretos pelo método quantitativo.

5.1.4 - Sensibilidade das técnicas estudadas ao teor de cloretos

O método de solução de nitrato de prata foi sensível na avaliação de cloretos livres nas primeiras idades, fato que justifica o objetivo proposto, por ser um método qualitativo, de fácil aplicação, barato e cuja verificação é feita no local, demonstrando de imediato se as amostras apresentam defeitos, se caso positivo, devemos solucionar os citados defeitos fazendo as devidas correções, assim evitando problemas estruturais futuros e contribuindo para uma maior sustentabilidade.

Quando os corpos-de-prova sofreram influência da carbonatação natural, a análise dos resultados tornou-se mais complexa. No entanto, quando é associada a aplicação do ácido nítrico com a solução de nitrato de prata, este novo composto elimina completamente a interferência da carbonatação, acusando somente a presença de cloretos livres através da coloração branca.

Como aplicabilidade do método de nitrato de prata é qualitativo e feito no local das atividades, é bem recebido no meio técnico, pois o objetivo é mostrar de imediato que a peça apresenta defeito, podendo de imediato ser feita as devidas correções, evitando futuros transtornos e com o nosso objetivo foi alcançado.

5.2 Sugestões

- Sugestões técnicas

Através das amostras submetidas a ciclos de imersão e secagem, pode-se determinar a profundidade de alcance de cloretos. No entanto, estas amostras merecem análises mais criteriosas. Neste caso, o método de aspersão de nitrato de prata deve ser auxiliado por outros ensaios eletroquímicos e/ou ensaios com indicadores de pH.

Outro aspecto imprescindível é a análise através de outra solução (como, por exemplo, ácido nítrico) que, em conjunto com a solução de nitrato de prata, detecte somente os cloretos livres das amostras.

- Sugestões ambientais

No mundo atual, a produção de estruturas de concreto para as atividades de construção civil, cada vez mais crescentes, exige um esforço gigantesco e contínuo, buscando aliar a qualidade à sustentabilidade, procurando evitar os erros de projeto e de execução, tornando as manutenções bem mais flexíveis.

O concreto tem como uma de suas características principais ser um produto limpo e ecologicamente correto, consumindo resíduos provenientes de outros setores. Devem-se projetar os produtos dele derivados com cuidado e confeccioná-los com o objetivo de serem bastante duráveis e com baixa necessidade de manutenção, contribuindo assim para uma maior qualidade de vida da população.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733**: Cimento Portland de alta resistência inicial: Especificação. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 5736**: Cimento Portland Pozolânico: Especificação. Rio de Janeiro, 1999.

_____. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova: Especificação. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 1978.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 6467**: Agregados - Determinação do inchamento de agregado miúdo - Método de ensaio Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 7211**: Agregado para Concreto: Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão: Especificação. Rio de Janeiro, 1997.

_____. **NBR 7218**: Agregados — Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 7584**: Concreto endurecido - Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão. Rio de Janeiro, 1995.

_____. **NBR 11578**: Cimento Portland composto - Especificação. Rio de Janeiro, 1997.

_____. **NBR NM 45**: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR NM 46**: Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 52:** Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 53:** Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 67:** Concreto - Determinação da consistência peso abatimento do tronco de cone: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NBR NM 248:** Determinação da composição granulométrica: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2003.

AL-KHAJA. Influence of temperature, cement type and level of concrete consolidation on chloride ingress in conventional and high-strength concretes. *Construction and Building Materials*, v. 11. n.1. pp. 9 – 13. 1997.

ANDRADE, J. J. O. **Durabilidade das estruturas do concreto armado: Análise das manifestações patológicas nas estruturas no Estado de Pernambuco.** Porto Alegre, Ano 1997. p. 148. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

ANDRADE, M. C. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras.** Trad. Antonio Carmona e Paulo Helene. São Paulo, Pini. Ano 1992.

ANDRADE, M. C.; GONZÁLEZ, J.A. Tendencias actuales en la investigación sobre corrosión de armaduras. **Informes de la construcción.** v. 40, n° 398, Ano 1988.

BAUER, E.; HELENE, P.R.L. Investigação comparativa da influência da escória de alto-forno na corrosão das armaduras. In: Proceedings of the international congress on high-performance concrete, and performance and quality of concrete structures. **Anais.** Florianópolis, SC, Ano 1996. p. 433-444..

COLLEPARDI, M. MARCIALIS, A. TURRIZIANI, R. Penetration of chloride ions in cement pastes and in concretes. **Journal of American Ceramic Society**, v. 55, n.10, p. 534-535, Ano 1972.

DAL MOLIN, D. C. C. **Fissuras em estruturas de concreto armado: Manifesta es t picas e levantamento de casos ocorridos no Estado do Rio Grande do Sul.** Porto Alegre, 1988. Disserta o (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Ano. 1988.

FIGUEIREDO, E. J. P. **Avalia o do desempenho de revestimento para prote o da armadura contra a corrosão através de técnicas eletroquímicas – contribui o ao estudo de reparo de estruturas de concreto armado.** Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Ano 1994.

GENTIL, V. **Corrosão**. 2. ed. Rio de Janeiro, pg. 01 Ano1996.

HELENE, P.R. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. Tese de livre docência. Universidade Politécnica do Estado de São Paulo. São Paulo, Ano 1993.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Durabilidade: Corrosão da Armadura no Concreto. In.: **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo, PINI, Ano 1994, p. 168-175.

MONTEIRO, P. J. Corrosão de armaduras e a sua relação com o concreto de alta resistência. **Notas de aula**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Ano 2002.

MONTEIRO, E. C. B.; NEPOMUCENO, A. A. **Influência do Tipo de Cimento na Capacidade de Proteção de Alguns Cimentos Nacionais em Relação à Corrosão da Armadura no período de Iniciação**, 1996. 138 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, Ano 1996.

OLLIVIER, J, P, Durability of concrete. São PAULO, Boletim Técnico, Ano 1998.

OTSUKI, N.; NAGATAKI, S.; NAKASHITA, K. Evaluation of AgNO₃ solution Spray Method for measurement of chloride penetration into hardener cementitious matrix materials. **ACI Materials Journal**. v. 89, nº 6, Ano 1992.

PAGE, C. L. Mechanism of Corrosion os Steel in Concrete: Effects os carbonatation and chlorides. Training and Development (Fosroc).

PAGE, C.L. SHORT, N.R.,HOLDEN, W.R. The influence of diffeente cements on chioride-induced corrosion of reinforcing steel. Cement and concrete Research, v. 16, p. 79 – 86. 1986.

SCHIESSI, P. Influence of the composition of concrete on the corrosion protection of the reinforcement. In. CONCRETE DURABILITY : Katherine and Bryant Mather International Conference. Detroit. Anais. 1987. P. 1633- 1650.

SILVA, M. G. AGOPYAN, V. A influência da temperatura na hidratação dos cimentos de escória de alto-forno. Boletim Técnico, p. 20. 1998.

NEVILLE, A. M. Propriedades do concreto. São Paulo. Pini.1997.

RILEM RECOMMENDATIONS. CPC-18 Measurement of hardened concrete carbonation depth. Ano 1988. p. 453-455.

RODRIGUES, J. C. Teste de teor de cloretos. **Revista recuperar-Patologia da Construção**. Ano 1994, p. 25-28.

SIERRA, A; SOUZA, V.C. M. Um estudo sobre a carbonatação do concreto utilizando cimentos brasileiros com adições. In.: **Damstruc**,. Niterói, RJ. Ano 1998. p 9

UNI. Determination of Chloride Ion Penetration, Italian Standard 7928, Rome, Ano 1978.

ANEXO



Ilustração 1 - Molde de 10cm x 20cm utilizado na preparação dos CP'S



Ilustração 2 - Molde de 5cm x 10cm utilizado na preparação dos CP'S



Ilustração 3 – Separação e pesagem do material para confecção do corpo de prova



Ilustração 4 – Moldagem dos corpos de prova no laboratório



Ilustração 5 – Formato do Aço tipo CA – 50 utilizado no experimento

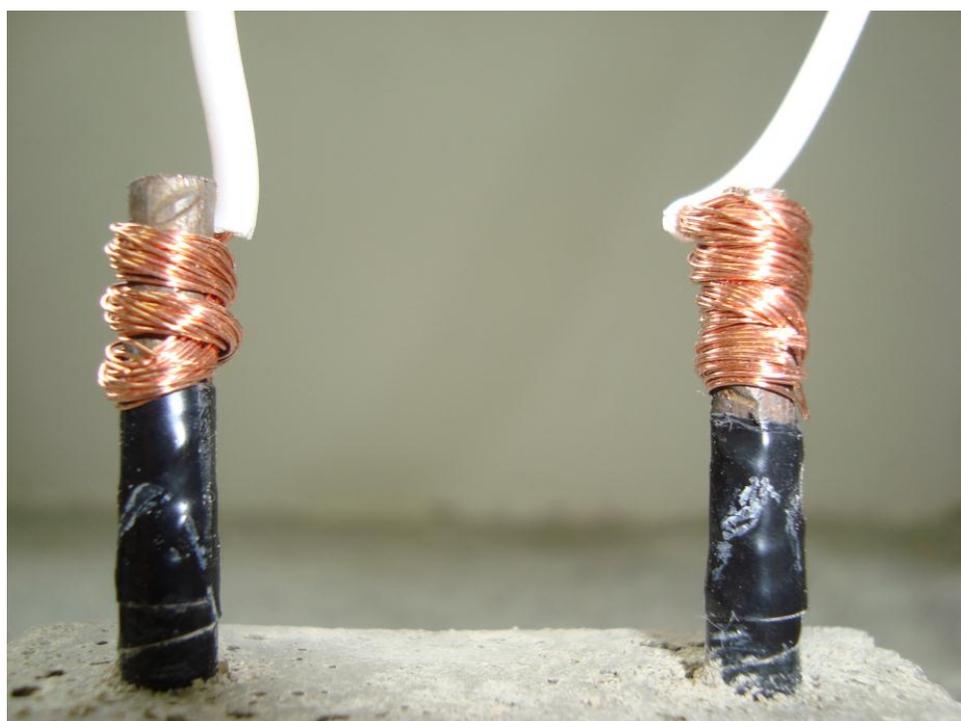


Ilustração 6 – Detalhamento na preparação do corpo-de-prova prismático



Ilustração 7 – Forma utilizada para confecção de corpo-de-prova prismático



Ilustração 8 – Moldagem do corpo de prova prismático

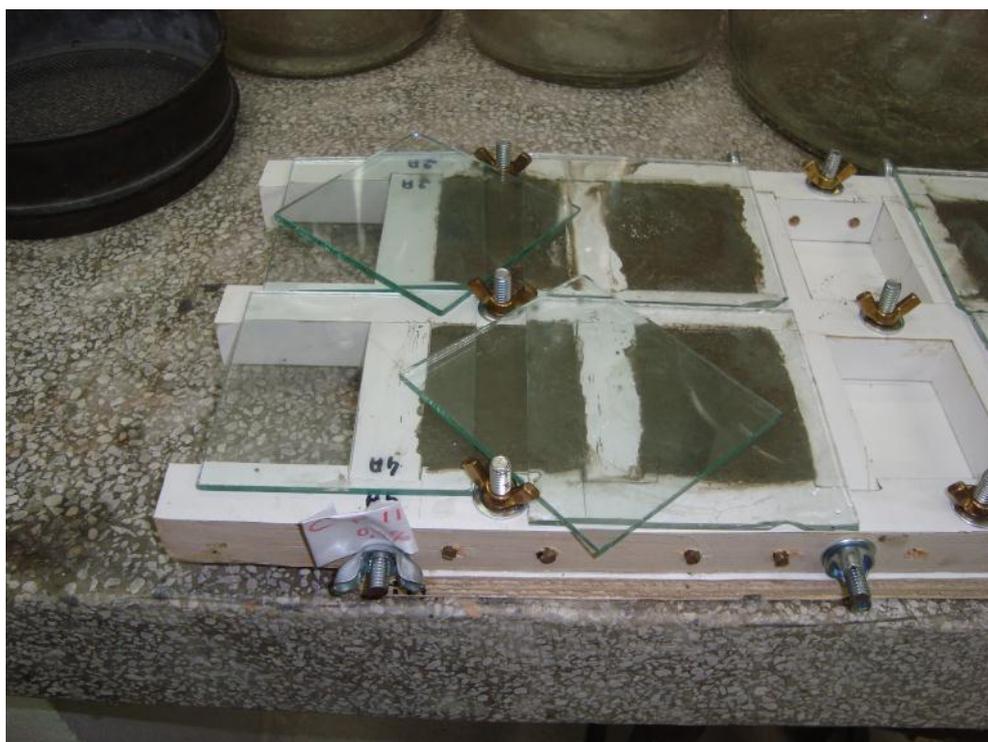


Ilustração 9 – Preparação dos corpos de prova prismáticos para o tempo de cura



Ilustração 10 – Os corpos de prova prismáticos no laboratório



Ilustração 11 – Preparação dos corpos-de-prova prismáticos para utilização nas leituras eletroquímicas



Ilustração 12 – Os corpos de prova prismático alojados no laboratório, utilizados nas leituras eletroquímicas



Ilustração 13 – Eletrodo- instrumento utilizado para leitura do potencial de corrosão



Ilustração 14 – Corpos de prova desmoldado



Ilustração 15 – Aferição através do Esclerômetro de reflexão do tipo SCHIMIDT



Ilustração 16 - Ensaio de resistência a compressão utilizando a Máquina Universal -



Ilustração 17 - Aplicação de solução de nitrato de prata nos corpos de prova



Ilustração 18 – Corpos de prova seccionados com diversos teores de cloretos



Ilustração 19 – Aferição da profundidade de carbonatação utilizando PAQUIMÉTRO